

Alexander Arndt



Bauteilindividuelle und verfahrens- spezifische Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung

**SHAKER
VERLAG**

Bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Alexander Arndt, M.Sc.

aus Siegen

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam
Tag der Einreichung:	07.11.2017
Tag der mündlichen Prüfung:	30.01.2018

Darmstadt 2018

D17

Forschungsberichte aus dem Fachgebiet
Datenverarbeitung in der Konstruktion

Band 60

Alexander Arndt

**Bauteilindividuelle und verfahrensspezifische
Kennzeichnung und Identifikation
für die Additive Fertigung**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2018

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2018

Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Nicht kommerziell - Keine Bearbeitungen 4.0 International Lizenz.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License.

URN urn:nbn:de:tuda-tuprints-74509

Copyright Shaker Verlag 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5858-1

ISSN 1435-1129

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die moderne Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) bietet vielfältige Innovations- und Leistungspotentiale, die im Entstehungsprozess neuer Produkte auszuschöpfen sind. Dies setzt jedoch voraus, dass die wissenschaftlichen Grundlagen zum Einsatz der modernen IKT in der Produktentstehung vorliegen und neue Methoden wissenschaftlich abgesichert sind. Darüber hinaus stellen die wissenschaftliche Durchdringung und die Bereitstellung wissenschaftlicher Forschungsergebnisse eine abgestimmte Kooperation zwischen Forschung und Industrie dar.

Vor diesem Hintergrund informiert diese Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Fachgebiets Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK) des Fachbereichs Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt.

Ziel der Forschungsarbeiten ist die wissenschaftliche Durchdringung innovativer, interdisziplinärer und integrierter Produktentstehungsprozesse und darauf aufbauend die Konzeption neuer Methoden für die Entwicklung, Konstruktion, Arbeitsvorbereitung und Herstellung neuer Produkte.

Der Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Dissertation fokussiert die Prozesskette zur Additiven Fertigung. Die Ausprägung dieser Prozesskette ermöglicht das Fertigen von kundenindividuellen Bauteilen in einer geringen Stückzahl bis hinunter zu Losgröße 1. Die hauptsächliche Herausforderung für das Fertigungsunternehmen besteht darin, dass in einem Bauprozess verschiedene kundenindividuelle Bauteile simultan gefertigt werden. Dies führt zu einer aufwändigen kundenspezifischen Zuordnung von Bauteilinformationen zu den dazugehörigen Kunden. Diese Zuordnung erstreckt sich über die gesamte Prozesskette der bauteilindividuellen Additiven Fertigung, vom Eingang der Auftragsdaten, über den Pre-, In- und Postprozess bis hin in die Nutzung und das Lebenszyklusende der Bauteile. Eine durchgängige Methode zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung existiert nicht.

Herr Arndt nimmt sich dieser Problemstellung anhand der vorliegenden Dissertation an und entwickelt neue Grundlagen für eine durchgängige bauteilindividuelle

und verfahrensspezifische Identifikation für die Additive Fertigung. Um dies zu erreichen wird in der vorliegenden Dissertation eine Methode zur Kennzeichnung additiv zu fertigender Bauteile und ein Informationsmodell zur Repräsentation relevanter bauteilindividueller Informationen über den gesamten Prozess hinweg entwickelt. Die Methode zur Bauteilkennzeichnung basiert auf einem bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnungsansatz, bestehend aus Kennzeichnungsträger und Identifikator, sowie der Anbringung dieses ausgewählten Ansatzes an der Bauteilgeometrie, basierend auf geeigneten Gestaltungsregeln. Aufbauend auf diesen Entwicklungen wird dem Anwender die durchgängige virtuelle und physische Identifikation und Nachverfolgung von kundenindividuellen additiv gefertigten Bauteilen ermöglicht.

Darmstadt, März 2018

Reiner Anderl

Vorwort des Autors

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK) im Fachbereich Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl, Leiter des Fachgebiets DiK. Seine wertvollen Anregungen, die fachlichen Diskussionen sowie die Bereitstellung von wissenschaftlichen Freiräumen haben zur Entstehung und Fertigstellung dieser Dissertation beigetragen. Dank seiner gutmütigen Förderung konnte ich nicht nur auf wissenschaftlicher, sondern auch auf industrieller und politischer Ebene viele wertvolle Erfahrungen sammeln.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam, Leiter des Instituts für Druckmaschinen und Druckverfahren an der Technischen Universität Darmstadt, danke ich herzlich für die Übernahme des Korreferats und die kritische Durchsicht meiner Dissertation.

Ich bedanke mich bei meinen ehemaligen Kollegen Anselm Schüle und Oliver Weitzmann die mich fachlich aber auch zwischenmenschlich entscheidend in meiner Anfangszeit am DiK geprägt haben. Besonderer Dank gilt meinen Kollegen und Freunden Oleg Anokhin, Cordula Auth, Sebastian Haag und Felix Heimrich für die gemeinsame Zeit im und abseits des DiK. Vor allem in der finalen Phase meiner Promotionszeit haben die unzähligen fachlichen Diskussionen mit Felix Heimrich wesentlich zur Anfertigung meiner Dissertation beigetragen.

Mein herzlicher Dank gilt auch meiner Familie, insbesondere meiner Mama Elisabeth und meinem Papa Hans-Ulrich Arndt sowie meinen Geschwistern Sebastian und Christoph, die mich auf meinem Weg stets begleitet und unterstützt haben.

Mein größter Dank gilt meiner Ehefrau Christina. Ihre uneingeschränkte Motivation und das ausdauernde Verständnis während meiner Promotionszeit haben zum Gelingen meiner Dissertation wesentlich beigetragen. Auch für ihre liebevolle Geduld an Wochenenden während der Erstellung meiner Dissertation gilt ihr ein ganz besonders herzlicher Dank.

Hachenburg, März 2018

Alexander Arndt

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Herausgebers.....	III
Vorwort des Autors	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XIV
Abkürzungsverzeichnis	XV
Symbolverzeichnis	XVII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation und Problemstellung	2
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Aufbau der Dissertation.....	7
2 Grundlagen und Stand der Technik.....	9
2.1 Prozesskette zur Additiven Fertigung	9
2.2 Additive Fertigungsverfahren	13
2.2.1 Strangablegeverfahren	14
2.2.2 Kunststoff-Laser-Sintern.....	16
2.2.3 Laser-Strahlschmelzen.....	17
2.2.4 Weitere additive Fertigungsverfahren	19
2.3 Nachbearbeitungsverfahren für die Additive Fertigung	19
2.3.1 Verfahrensspezifische Nachbearbeitungsverfahren	20
2.3.2 Anwendungsspezifische Nachbearbeitungsverfahren.....	21
2.3.2.1 Abtragende Nachbearbeitungsverfahren	21
2.3.2.2 Auftragende Nachbearbeitungsverfahren	22
2.3.2.3 Thermische Nachbearbeitungsverfahren	24
2.3.3 Zusammenfassung der Nachbearbeitungsverfahren.....	25
2.4 Auswirkungen von Fertigungs- und Nachbearbeitungsverfahren auf den Pre-Prozess	26
2.4.1 Auswirkungen auf die Bauteilprüfung	27
2.4.2 Auswirkungen auf die Bauteilorientierung und -positionierung	31

2.4.3	Auswirkungen auf die Stützstruktur- und Schichtdatengenerierung	35
2.5	Kennzeichnung und Identifikation von Bauteilen.....	39
2.5.1	Identifikatorarten	39
2.5.1.1	Optisch auslesbare Identifikatoren.....	41
2.5.1.2	Elektronisch auslesbare Identifikatoren	45
2.5.2	Möglichkeiten zur Bauteilkennzeichnung	46
2.5.2.1	Volumenintegrierte Kennzeichnungsträger	47
2.5.2.2	Oberflächenintegrierte Kennzeichnungsträger	48
2.5.2.3	(Partiell-)körperumschließende Kennzeichnungsträger	50
2.6	Relevante Forschungsansätze und industrielle Umsetzungen.....	51
2.7	Fazit und Potentiale	55
3	Handlungsbedarf und Anforderungsprofil	57
3.1	Handlungsbedarf	57
3.2	Zieldefinition	58
3.3	Betrachtete Anwendungsfälle	59
3.4	Anforderungen.....	63
3.4.1	Anforderungen an die Methode zur Bauteilkennzeichnung	64
3.4.2	Anforderungen an das Informationsmodell.....	67
3.4.3	Anforderungen an die durchgängige Identifikation.....	70
3.4.4	Anforderungen an die Implementierung	73
3.4.5	Zusammenfassung der Anforderungen	76
4	Konzept zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung	81
4.1	Definition der Begrifflichkeiten	82
4.2	Konzeptionelle Vorgehensweise	85
4.3	Konzeptstruktur	87
4.4	Methode zur Kennzeichnung von additiv zu fertigenden Bauteilen	90
4.4.1	Auswahl Kennzeichnungsträger und Identifikatorart	93
4.4.1.1	Entwicklung universale K-I-Kombinationsmatrix ..	96
4.4.1.2	Bestimmung bauteilindividuelle K-I-Kombinationsmatrix.....	100
4.4.2	Anbringung von K-I-Kombination an Bauteil.....	108
4.4.2.1	Kennzeichnungsträgergerechte Gestaltungsregeln	109
4.4.2.2	Identifikatorgerechte Gestaltungsregeln	115

4.4.2.3	K-I-Kombination an Bauteil anbringen	117
4.5	Informationsmodell zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung.....	124
4.5.1	Struktur des Informationsmodells	126
4.5.2	Kern des Informationsmodells.....	128
4.5.3	Partialmodelle im Pre-Prozess	130
4.5.3.1	Partialmodell: Bauteilprüfung.....	130
4.5.3.2	Partialmodelle: Bauteilorientierung und -positionierung.....	131
4.5.3.3	Partialmodell: Bauteilkennzeichnung.....	132
4.5.3.4	Partialmodell: Stützstruktur und Schichtdaten....	134
4.5.4	Partialmodelle: In- und Post-Prozess sowie Nutzung und Lebenszyklusende.....	136
4.5.5	Erweiterbarkeit des Informationsmodells	138
4.6	Bereitstellung einer durchgängigen Identifikation	138
4.7	Fazit	141
5	Prototypische Implementierung.....	143
5.1	Struktur der technischen Umsetzung.....	143
5.2	Benutzungsoberflächen	145
5.2.1	Prozessorientierter Informationsbrowser zur Identifikation und Nachverfolgung.....	145
5.2.2	Rechnergestütztes Werkzeug zur Bauteilkennzeichnung ..	147
5.3	Objektorientierte Datenbank	151
5.4	Datenschnittstelle.....	152
5.5	Fazit	153
6	Validierung und Verifikation.....	155
6.1	Auswahl repräsentativer Beispiele	155
6.2	Verwendete Steuergrößen	157
6.2.1	K-I-Kombinationsmatrix	157
6.2.2	Spezifische Gestaltungsregeln	159
6.3	Durchführung der Validierung.....	162
6.3.1	K-I-Kombination auswählen und an Bauteil anbringen.....	162
6.3.2	Bauteilindividuelle Informationen identifizieren und nachverfolgen.....	165
6.4	Verifikation des Anforderungsprofils	169
6.5	Fazit	175
7	Ausblick.....	177

8	Zusammenfassung.....	181
9	Literatur	185
10	Anhang	207
10.1	Ausgefüllte universale K-I-Kombinationsmatrix.....	207

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Qualitative Zusammenhänge zwischen Stückkosten und Losgröße (links) sowie zwischen Stückkosten und Komplexität der Bauteile (rechts), in Anlehnung an [22; 256]	2
Abbildung 1-2: Gepackter virtueller Bauraum mit kundenindividuellen Bauteilen, hier Kunststoff-Laser-Sintern	3
Abbildung 2-1: Prozess der Additiven Fertigung, vereinfachte Darstellung in Anlehnung an [238]	10
Abbildung 2-2: Prozesskette zur Additiven Fertigung in Anlehnung an Gibson [18; 112]	11
Abbildung 2-3: Prozesskette zur bauteilindividuellen Additiven Fertigung (aufbauend auf [22; 242])	12
Abbildung 2-4: Klassifizierung additiver Fertigungsverfahren (In Anlehnung an [5; 109; 110; 160])	14
Abbildung 2-5: Verfahrensprinzip: Strangablegeverfahren (in Anlehnung an [238; 242])	15
Abbildung 2-6: Verfahrensprinzip: Kunststoff-Laser-Sintern (in Anlehnung an [238; 242])	16
Abbildung 2-7: Verfahrensprinzip: Laser-Strahlschmelzen (in Anlehnung an [238; 242])	18
Abbildung 2-8: Prüfung von Elementdicken bei nicht gekrümmten und einfach gekrümmten Elementen nach [7]	28
Abbildung 2-9: Prüfung von Durchmesser bei einfach gekrümmten Elementen nach [7; 204]	29
Abbildung 2-10: Ausgangs- und optimierte Orientierung eines Festkörpergelenks	32
Abbildung 2-11: Dreidimensionales Packproblem beim Kunststoff-Laser-Sintern	34
Abbildung 2-12: Anwendung von Stützstrukturen in Anlehnung an [172]	36
Abbildung 2-13: Beschreibung STL-Format (links) und festzulegende Approximationswerte (rechts)	37
Abbildung 2-14: Beispielhafte Belichtungs- und Füllstrategien in der Schichtdatengenerierung	39
Abbildung 2-15: Identifikatorarten – Übersicht aufbauend auf [118; 243]	40
Abbildung 2-16: Optisch auslesbare Identifikatoren – Relevante Übersicht	41
Abbildung 2-17: Klassifizierung Kennzeichnungsträger	47
Abbildung 2-18: Betrachtete Umsetzungsmittel volumenintegrierter Kennzeichnungsträger (nach [16; 137])	47
Abbildung 2-19: Betrachtete Umsetzungsmittel oberflächenintegrierter Kennzeichnungsträger (in Anlehnung an [137])	49
Abbildung 2-20: Betrachtete Umsetzungsmittel (partiell-)körperumschließender Kennzeichnungsträger	50
Abbildung 3-1: Anwendungsfalldiagramm der bauteilindividuellen Additiven Fertigung	60

Abbildung 4-1: Bestandteile Identifikationssystem, aufbauend auf [119]	84
Abbildung 4-2: Konzeptstruktur – Vier-Ebenen-Modell	88
Abbildung 4-3: Prozessmodell für Bauteilkennzeichnung in SADT	91
Abbildung 4-4: Ablauf der Aktivität A1 – K-I-Kombination auswählen	94
Abbildung 4-5: Klasse K-I-Kombination in UML	99
Abbildung 4-6: Auswahl der bauteilindividuellen K-I-Kombination durch Vergleichen der Attributwerte	101
Abbildung 4-7: Ableitung von ebenen Flächen bestimmter Größe – einfaches Beispiel	103
Abbildung 4-8: Schematische Darstellung der Wandstärkenanalyse.....	104
Abbildung 4-9: Bestimmung lokaler Hüllkörper von Bauteilgeometrie – Beispiel	105
Abbildung 4-10: Anzahl von Volumendurchbrüchen basierend auf STL-Datei – am Beispiel eines Festkörpergelenks.....	108
Abbildung 4-11: Ablauf der Aktivität A2 – K-I-Kombination an Bauteil anbringen.....	118
Abbildung 4-12:Ablauf der Aktivität K _i	119
Abbildung 4-13: Beispiel – volumenintegrierte Hohlraumeinbringung mit QR-Code (links) und RFID-Transponder (rechts) als Identifikatoren	121
Abbildung 4-14: Beispiel Festkörpergelenk – oberflächenintegrierte Materialintrusion und -extrusion mit Dotcode (links) und Barcode (rechts) als Identifikatoren.....	122
Abbildung 4-15: Beispiele – Kennzeichnungsträger K4 an Turbinenschaufel (links), K5 an Zahnrad (mittig) und K6 an Festkörpergelenk (rechts) mit optischer Zeichenerkennung als Identifikator	122
Abbildung 4-16: Struktur des Informationsmodells – schematisch	127
Abbildung 4-17: Bauteilindividuelles Kernmodell	129
Abbildung 4-18: Partialmodell für die Bauteilprüfung.....	130
Abbildung 4-19: Partialmodell für die Bauteilorientierung und - positionierung	132
Abbildung 4-20: Partialmodell für die Bauteilkennzeichnung	133
Abbildung 4-21: Partialmodell für Stützstruktur und Schichtdaten	135
Abbildung 4-22: Partialmodell für den In-Prozess.....	136
Abbildung 4-23: Partialmodell für den Post-Prozess.....	137
Abbildung 4-24: Partialmodell für die Nutzung und das Lebenszyklusende	138
Abbildung 4-25: Integration der Software-Applikation in Gesamtkonzept.....	139
Abbildung 5-1: Überblick über die Struktur der technischen Umsetzung	144
Abbildung 5-2: Benutzungsoberfläche zur Auswahl einer Funktionalität in der Software-Applikation additiv-ID.....	145
Abbildung 5-3: Benutzungsoberfläche zur Identifikation und Nachverfolgung von kundenindividuellen Bauteilen.....	146
Abbildung 5-4: Benutzungsoberfläche Autodesk Netfabb Ultimate 2018.....	148

Abbildung 5-5: Benutzungsoberfläche des Assistenzsystems zur Bauteilkennzeichnung	149
Abbildung 5-6: Programmablauf zur Prüfung auf ebene Flächen mit ausreichender Flächengröße und -proportion.....	150
Abbildung 5-7: Schritte zur Anbringung der K-I-Kombination an der Bauteilgeometrie	151
Abbildung 5-8: Beispiel einer XML-Austauschdatei der Bauteilkennzeichnung	153
Abbildung 6-1: Kundentyp 1 – Anforderungsprofil und Bauteilgeometrie.....	156
Abbildung 6-2: Kundentyp 2 – Anforderungsprofil und Bauteilgeometrie.....	156
Abbildung 6-3: Benutzungsoberfläche zur Bauteilkennzeichnung für Kundentyp 1	163
Abbildung 6-4: Anbringung K-I-Kombination für Kundentyp 1	164
Abbildung 6-5: Benutzungsoberfläche (links) und gekennzeichnete Bauteilgeometrie (rechts) für Kundentyp 2	165
Abbildung 6-6: Benutzungsoberfläche zur Identifikation und Nachverfolgung – Allgemeine Informationen zum Kundenauftrag	166
Abbildung 6-7: Benutzungsoberfläche zur Identifikation und Nachverfolgung – Bauteilkennzeichnung	167
Abbildung 6-8: Benutzungsoberfläche zur Identifikation und Nachverfolgung – Bauteilpositionierung.....	168
Abbildung 6-9: Benutzungsoberfläche zur Identifikation und Nachverfolgung – In-Prozess	169

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Zusammenfassung der Nachbearbeitungsverfahren.....	26
Tabelle 2-2: Verfahrensspezifische Bauteilprüfung.....	30
Tabelle 3-1: Anforderungsprofil an die bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Kennzeichnung und Identifikation in der Additiven Fertigung (fortlaufend)	76
Tabelle 4-1: Universale K-I-Kombinationsmatrix	98
Tabelle 4-2: Generelle Regeln für volumenintegrierte Hohlraumeinbringung .	109
Tabelle 4-3: Generelle Regeln für oberflächenintegrierte Materialintrusion und -extrusion.....	111
Tabelle 4-4: Generelle Regeln für oberflächenintegrierte Formelementanbringung.....	112
Tabelle 4-5: Generelle Regeln für körperumschließenden Hüllkörper	113
Tabelle 4-6: Generelle Regeln für partiell körperumschließendes Formelement.....	114
Tabelle 4-7: Generelle identifikatorgerechte Gestaltungsregeln (fortlaufend) .	115
Tabelle 4-8: Referenzierung interner und kundenindividueller Identifikationsnummern.....	139
Tabelle 6-1: Universale K-I-Kombinationsmatrix inklusive Attributwerte – Auszug	159
Tabelle 6-2: Spezifische Gestaltungsregeln zur Validierung (fortlaufend)	160
Tabelle 6-3: Übersicht der Anforderungserfüllung (fortlaufend)	171
Tabelle 10-1: Bewertungskriterien zur Bestimmung der wirtschaftlichen Wertigkeit	208
Tabelle 10-2: Ausgefüllte universale K-I-Kombinationsmatrix (fortlaufend)	209

Abkürzungsverzeichnis

2,5D.....	zweieinhalbdimensional
2D.....	zweidimensional
3D.....	dreidimensional
3MF	3D Manufacturing Format
ABS.....	Acrylnitril-Butadien-Styrol (Thermoplast)
AF.....	Additive Fertigung
AFV.....	additives Fertigungsverfahren
AMF.....	Additive Manufacturing File Format
API.....	Application Programming Interface
as	anwendungsspezifisch
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASTM	American Society for Testing and Materials
BPMN	Business Process Model and Notation
B-Rep.....	Boundary Representation
CAD	Computer Aided Design
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMLS.....	Direct Metal Laser Sintering™
DMP	Direct Metal Printing™
EAN	European Article Number
eEPK	erweiterte Ereignisgesteuerte Prozesskette
EN	Europäische Norm
EPK.....	Ereignisgesteuerte Prozesskette
F	Festforderung
FDM	Fused Deposition Modelling™
HF	High Frequency
I.....	Identifikator
ID	Identifikationsnummer
ISO	Internationale Organisation für Normung

JT	Jupiter Tessellation Format
K	Kennzeichnungsträger
LF	Low Frequency
LMF	Laser Metal Fusion™
NBV	Nachbearbeitungsverfahren
NFC	Near Field Communication
OCR	Optical Character Recognition
PA	Polyamid (Thermoplast)
PC	Polycarbonat (Thermoplast)
PI	Polyimid (Thermoplast)
PLA	Polymilchsäure (Thermoplast)
PLZ	Postleitzahl
PM	Partialmodell
PVC	Polyvinylchlorid (Thermoplast)
QR-Code	Quick Response Code
RFID	Radio-Frequency Identification
SADT	Structured Analysis and Design Technique
SLA	Stereolithografie oder Stereolithography™
SLM	Selective Laser Melting™
SLS	Selective Laser Sintering™
STL	Standard Tessellation Language
UHF	Ultra High Frequency
UML	Unified Modeling Language
UPC	Universal Product Code
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vs	verfahrensspezifisch
W	Wunsch
XML	Extensible Markup Language
ZODB	Zope Object Database (objektorientierte Datenbank)

Symbolverzeichnis

\vec{r}_i	Ortsvektor
\vec{n}	Normalenvektor
\vec{v}	zwei- oder dreidimensionaler Verschiebungsvektor
a	Abstand zwischen Bauteilen
A_1, A_2	Querschnittsfläche
A_J	Flächeninhalt von Dreieck
A_k	Attributart für K-I-Kombinationsmatrix
A_{\min}	minimale Querschnittsfläche
a_{\min}	minimaler Abstand
b	Abstand Bauteil zu Bauraumrand
b_{\max}	maximale Breite
b_{\min}	minimale Breite
CO_2	Kohlenstoffdioxid
d	Elementdicke
d_{\max}	maximaler Durchmesser
d_{\min}	minimaler Durchmesser
E	Edge (Anzahl der Kanten)
F	Face (Anzahl der Flächen)
H	Hole (Anzahl der „Löcher“ in den Flächen)
h_{\max}	maximale Höhe
h_{\min}	minimale Höhe
I_1	optische Zeichenerkennung (OCR)
I_2	Barcode – EAN-Code 128
I_3	Matrixcode – Dotcode A
I_4	Matrixcode – QR-Code
I_5	RFID-/NFC-Technologie
I_j	Identifikatorart
K_1	volumenintegrierte Hohlraumeinbringung

K_2	oberflächenintegrierte Materialintrusion
K_3	oberflächenintegrierte Materialeextrusion
K_4	oberflächenintegrierte Formelementanbringung
K_5	körperumschließender Hüllkörper
K_6	partiell körperumschließendes Formelement
$K_{F,i,j}$	wirtschaftliche Wertigkeit
K_i	Kennzeichnungsträgerart
K_{ij}	Kombination aus Kennzeichnungsträger- und Identifikatorart
l_{\max}	maximale Länge
l_{\min}	minimaler Strichabstand
R	Ring (Anzahl der „Volumendurchbrüche“ im Körper)
$R_{(x,\alpha);(y,\beta);(z,\gamma)}$..	Rotationmatrix um den Winkel $\alpha/\beta/\gamma$ um die x-/y-/z-Achse
r_a	Elementaußendurchmesser
r_i	Elementinnendurchmesser
r_{\min}	minimaler Rechteckgröße
S	Shell (Anzahl der äußeren oder inneren Oberflächen)
s_{\min}	minimale Strichbreite
t_{\max}	maximale Tiefe
t_{\min}	minimale Tiefe
V	Vertice (Anzahl der Eck-/Endpunkte)
x_{BR}	Koordinatenachse x des Bauraums
x_{BT}	Koordinatenachse x des Bauteils
y_{BR}	Koordinatenachse y des Bauraums
y_{BT}	Koordinatenachse y des Bauteils
z_{BR}	Koordinatenachse z des Bauraums
z_{BT}	Koordinatenachse z des Bauteils
α	Rotationswinkel um x-Achse
β	Rotationswinkel um y-Achse
γ	Rotationswinkel um z-Achse

1 Einleitung

Zur durchgängigen Identifikation in der bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Additiven Fertigung wird in dieser Dissertation eine Methode zur Kennzeichnung additiv zu fertigender Bauteile und ein Informationsmodell zur Repräsentation relevanter bauteilindividueller Informationen über den gesamten Prozess hinweg entwickelt. Die Methode zur Bauteilkennzeichnung basiert auf einem bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnungsansatz, bestehend aus Kennzeichnungsträger und Identifikator, sowie der Anbringung dieses ausgewählten Ansatzes, basierend auf entwickelten Gestaltungsregeln, an der Bauteilgeometrie. Aufbauend auf diesen Entwicklungen wird dem Anwender die durchgängige virtuelle und physische Identifikation und Nachverfolgung von kundenindividuellen additiv gefertigten Bauteilen bereitgestellt.

Ziel ist es, dem Mitarbeiter im Pre-Prozess bei der Kennzeichnung zu fertigender Bauteile methodenbasiert zu unterstützen sowie dem Anwender ein rechnergestütztes Werkzeug zur durchgängigen Nachverfolgung von additiv gefertigten Bauteilen bereitzustellen. Die gegenwärtige Ausprägung der Prozesskette zur kundenindividuellen Additiven Fertigung ist nicht für derartige Zielstellungen ausgelegt und stellt keine Unterstützungen zur Verfügung. Ferner erfolgt die Bearbeitung der einzelnen Prozessschritte auf dem Erfahrungswissen der Bediener. Die hierdurch vorliegende manuelle Aufbereitung von Informationen in der Prozesskette führt sowohl zu einem höheren Arbeitsaufwand aber auch zu Informationsverlusten im Datenaustausch. Diese Informationsverluste und Medienbrüche erstrecken sich auch in den In- und Post-Prozess der bauteilindividuellen Additiven Fertigung. Eine Zuordnung von gefertigten physischen Bauteilen zu Kundenaufträgen im In- und Post-Prozess erfolgt papier- und dokumentenbasiert anhand manuell durchgeführter Vergleiche durch den jeweiligen Mitarbeiter. Darüber hinaus existiert keine Verarbeitung bauteilindividueller Informationen in der Prozesskette.

An dieser Stelle setzt diese Dissertation an. Die entwickelten Ansätze und Lösungen ermöglichen eine durchgängige virtuelle und physische Identifikation für die bauteilindividuelle Additive Fertigung. Kern ist dabei die Verwendung eines bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnungsansatzes bestehend

aus einem Kennzeichnungsträger und einem Identifikator. Dieser wird bauteilindividuell ausgewählt und an der jeweiligen Bauteilgeometrie mithilfe von geometrischen und topologischen Methoden angebracht. Hierdurch wird eine durchgängige virtuelle und physische Identifikation ermöglicht.

Im weiteren Verlauf der Einleitung werden in Unterkapitel 1.1 die vorliegende Problemstellung sowie die Motivation für den gewählten Themenbereich beschrieben. Ausgehend von der beschriebenen Problemstellung werden Zielstellungen zur Lösung eben dieser Probleme formuliert, siehe Unterkapitel 1.2. Das wissenschaftliche Vorgehen zur Problemlösung spiegelt sich im Aufbau dieser Dissertation wider und wird in Unterkapitel 1.3 aufgezeigt.

1.1 Motivation und Problemstellung

Die Verwendung additiver Fertigungsverfahren bietet die Möglichkeit, Bauteile und Produkte zu fertigen, welche bisher mit keinem anderen Fertigungsverfahren oder nur unter hohem wirtschaftlichen Aufwand herzustellen waren. Dabei hat die Komplexität der gefertigten Bauteile im Gegensatz zu konventionellen Fertigungsverfahren einen geringen Einfluss auf die Fertigungsdauer und die -kosten [186; 195], siehe Abbildung 1-1 (rechts). Dies ermöglicht das Fertigen von fast beliebig komplexen Strukturen, wie beispielsweise an die Bionik angelehnte Leichtbaustrukturen. Hierdurch können wiederum Gewicht und Materialkosten eingespart werden.

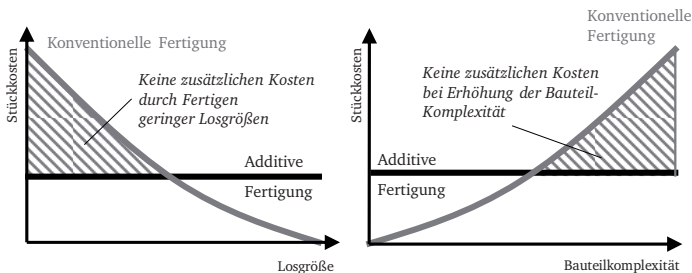


Abbildung 1-1: Qualitative Zusammenhänge zwischen Stückkosten und Losgröße (links) sowie zwischen Stückkosten und Komplexität der Bauteile (rechts), in Anlehnung an [22; 256]

Neben der erreichbaren Bauteilkomplexität ermöglicht die Ausprägung der Prozesskette zur Additiven Fertigung insbesondere bei geringen Stückzahlen eine kos-

tengünstigere Fertigung gegenüber dem Einsatz von konventionellen Fertigungsverfahren [161], siehe Abbildung 1-1 (links). Dadurch können Fertigungsunternehmen kundenindividuellen Wünschen einfacher Nachkommen und Marktnischen bedient werden. Als Beispiel sind hier Anpassungen von Produkten an den menschlichen Körper zu nennen. Beispielsweise wird im medizinischen Bereich die Additive Fertigung zur Herstellung von Prothesen oder Zahnimplantaten verwendet. Aber auch im klassischen Maschinenbaubereich steigt die Nachfrage nach Bauteilen in geringer Stückzahl bis hin zu Losgröße 1. Durch die digitale Ausprägung der Prozesskette und den Vorzügen in der Fertigung selbst stellt die Additive Fertigung den Treiber für eine individualisierte Massenproduktion dar [96].

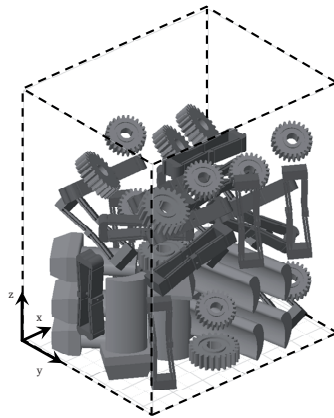


Abbildung 1-2: Gepackter virtueller Bauraum mit kundenindividuellen Bauteilen, hier Kunststoff-Laser-Sintern

Die wesentliche Herausforderung für das Fertigungsunternehmen liegt darin begründet, dass in einem Bauprozess in einer additiven Fertigungsanlage differente kundenspezifische Bauteile simultan verarbeitet werden. Es findet eine intensive manuelle und auftragspezifische Zuordnung von additiv gefertigten Bauteilen zu den zugehörigen Kunden statt. Diese Zuordnung erstreckt sich sowohl über die virtuellen Prozessschritte als auch über die physischen Prozessschritte der Prozesskette zur Additiven Fertigung. Abbildung 1-2 zeigt diese Problematik für den gepackten virtuellen Bauraum im Pre-Prozess für das Kunststoff-Laser-Sintern. Eine eindeutige Zuordnung von Bauteilen zu Kunden ist sowohl im Pre-Prozess als auch im In- und Post-Prozess nicht durchgängig verfügbar.

Die Durchführung der Prozessschritte in der Prozesskette zur bauteilindividuellen Additiven Fertigung basiert auf dem Erfahrungswissen der Bediener. Insbesondere

der Pre-Prozess unterliegt einem hohen Einfluss des jeweiligen Bedieners. Hier werden die Bauteile auf Fertigbarkeit geprüft, im virtuellen Bauraum orientiert und gemeinsam positioniert. Abschließend werden etwaig erforderliche Stützstrukturen erzeugt und die maschinenlesbaren Steuerdaten errechnet. Diese bedienerspezifische Durchführung der Prozessschritte führt zu unterschiedlichen Ergebnissen durch unterschiedliche Bediener. Es findet kein informationsmodellbasiertes Agieren in der Prozesskette statt. Um der oben genannten Problematik der Nachverfolgung, virtuell wie physisch, nachzukommen, bedarf es der Kennzeichnung der Bauteile, um diese nach dem In- und während des Post-Prozesses zu identifizieren. Diese Kennzeichnung wird optional im Pre-Prozess durchgeführt. Dabei modifiziert der Anwender jedoch das zu fertigende Bauteil manuell durch eine Kennzeichnung, ohne über das Wissen einer möglichst optimalen Kennzeichnungsart und deren Position am Bauteil zu verfügen. Ferner stehen ihm keine Informationen über die technische Umsetzbarkeit verschiedener Kennzeichnungsmöglichkeiten beim Einsatz unterschiedlicher additiver Fertigungsverfahren in Kombination mit differenten Nachbearbeitungsverfahren zur Verfügung. Es fehlen dementsprechend die Wechselwirkungen zwischen Kennzeichnungsart, Identifikationsart, den eingesetzten Fertigungs- und Nachbearbeitungsverfahren sowie der Bauteilgeometrie. In einer Vielzahl an Anwendungsfällen wird heute gänzlich auf eine Kennzeichnung von additiv gefertigten Bauteilen verzichtet. Dies zieht eine manuelle Zuordnung von Bauteil zu Kunde nach dem In- und während des Post-Prozesses nach sich. Diese Zuordnung erfolgt überwiegend papierbasiert und der Mitarbeiter vergleicht die Kundenauftragsdaten mit den gefertigten Bauteilen optisch und ordnet sie hierdurch zu. Bei sehr ähnlichen Bauteilen erfordert dieser Vergleich das Anwenden von Messverfahren zur Differenzierung und Identifikation von kundenindividuellen Bauteilen. Weiterhin führt die fehlende durchgängige Identifikation zu dem Missstand, dass keine Rückschlüsse von einem auftretenden Bauteilversagen auf etwaige Fehler im Pre-Prozess geschlossen werden können. Auch ist die bauteilindividuelle Kosten- und Energieverbrauchsermittlung durch die fehlenden Informationen nicht möglich.

Diese Problemstellungen motivieren den Bedarf einer bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation von Bauteilen über den gesamten Prozess der Additiven Fertigung hinweg.

1.2 Zielsetzung

Der wissenschaftliche Kern dieser Dissertation ist die Bereitstellung eines bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnungsansatzes, bestehend aus

Kennzeichnungsträger und Identifikator, für die Additive Fertigung ausgehend von anforderungs- und geometriebasierten Methoden. Die Verwendung dieses Ansatzes bildet die Basis für eine durchgängige Identifikation in der bauteilindividuellen Additiven Fertigung. Hieraus lassen sich verschiedene Zielstellungen ableiten und definieren.

Ein Ziel ist es, eine Methode zur Kennzeichnung von additiv zu fertigenden Bauteilen für den Anwender im Pre-Prozess bereitzustellen. Dies erfordert eine Anpassung und Erweiterung der Prozesskette zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Additiven Fertigung. Die erweiterte Beschreibung der Prozesskette integriert die Methode zur Bauteilkennzeichnung im Pre-Prozess. Die Vorgehensmethode gliedert sich in zwei wesentliche Aktivitäten. In einem ersten Auswahlsschritt wird für den individuellen Anwendungsfall die optimale Kombination aus Kennzeichnungsträger und Identifikator bestimmt. Ein Identifikator repräsentiert ein zugewiesenes Merkmal zur eindeutigen Identifikation eines Objektes bzw. Bauteils, beispielsweise ein QR-Code oder ein RFID-Transponder. Der Kennzeichnungsträger wird zur Anbringung des Identifikators am Objekt bzw. Bauteil benötigt. Beispiele für Kennzeichnungsträger sind demnach das Anbringen von Formelementen zur Platzierung eines QR-Codes oder das Verwenden von Hohlräumen in Objekten zur Einbringung von RFID-Transpondern. Der Kennzeichnungsansatz bestehend aus Kennzeichnungsträger und Identifikator stellt einen gänzlich neuen Ansatz im Bereich der Additiven Fertigung dar. Hierdurch können verschiedene Kundentypen und Anwendungsfälle bedient werden. Grundlage für die Auswahl der bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kombination aus Kennzeichnungsträger und Identifikator bildet ein Wissensspeicher zur Abfrage der technischen Umsetzbarkeit von Kundenanforderungen und der zu fertigenden Bauteilgeometrie. Basierend auf diesem Wissensspeicher in Form einer Kombinationsmatrix sollen durch die Analyse der individuellen Anforderungen des Kunden nicht umsetzbare Lösungen eliminiert werden. Diese Kombinationsmatrix beinhaltet Aussagen zur technischen Umsetzbarkeit von Kombinationen aus Kennzeichnungsträger und Identifikator für den individuellen Anwendungsfall. In einem weiteren Schritt soll eine Geometrie- und Topologieanalyse der zu fertigenden Bauteilgeometrie die weitere Eliminierung von in Frage kommenden Kennzeichnungskombinationen ermöglichen. Um eine für das vorliegende Anforderungsprofil und kundenindividuelle Bauteil optimale Kombination aus Kennzeichnungsträger und Identifikator zu erhalten, wird abschließend ein wirtschaftlicher relativer Vergleich durchgeführt. Ergebnis ist eine ausgewählte bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Kombination aus Kennzeichnungsträger und Identifikator. Die

zu entwickelnde Methode soll durch die zweite Aktivität, dem Anbringen der ausgewählten Kombination, komplettiert werden. Für eine qualitätsgerechte Anbringung der Kombination aus Kennzeichnungsträger und Identifikator sollen generelle Gestaltungsregeln entwickelt und eingesetzt werden. Unter Einbeziehung von kennzeichnungsträger- und identifikatorgerechten Gestaltungsregeln modifizieren Algorithmen die kundenindividuellen Bauteilgeometrien. Basis hierfür sind geometrische Vorlagen, welche über boolesche Operatoren an die zu fertigenden Geometriemodelle angebracht werden.

Ein weiteres Ziel ist die durchgängige Verarbeitung von Informationen aus dem gesamten Prozess der bauteilindividuellen Additiven Fertigung. Hierzu müssen Fragen bezüglich der Formalisierung und Integration von Elementen und Beziehungen diskutiert werden. Die rechnerinterne Abbildung erfordert die Beschreibung dieser Informationen in formalen Modellen. Ziel ist es demnach, die aus dem Prozess resultierenden Informationen in ein Informationsmodell zu überführen. Für eine durchgängige Identifikation und Nachverfolgung von additiv gefertigten Bauteilen müssen die relevanten Informationen aus den beteiligten Prozessschritten abgebildet werden. Hierzu zählen Informationen zur Bauteilprüfung, Bauteilorientierung, Bauteilkennzeichnung, Bauteilpositionierung und aus dem In- sowie Post-Prozess. Für eine ganzheitliche Betrachtungsweise sollen auch Informationen aus der Nutzung und dem Lebenszyklusende des Bauteils verarbeitet werden. Aufgrund der hierdurch entstehenden Komplexität soll das Informationsmodell in Teilprozesse bzw. Partialmodelle zerlegt werden. Bauteilindividuelle zentrale Informationen, wie beispielsweise Bauteil-Identifikationsnummer (ID), kundenindividuelles Anforderungsprofil oder die Bauteilgeometrie selbst, werden in einem Kernmodell abgebildet. Die Integration über die Partialmodelle erfolgt über dieses Kernmodell.

Zur Erreichung des übergeordneten Ziels, der Bereitstellung einer durchgängigen virtuellen und physischen bauteilindividuellen Identifikation, ist es erforderlich, dass dem Anwender aufbauend auf der entwickelten Methode zur Bauteilkennzeichnung und dem formalisierten Informationsmodell die relevanten Funktionen und Informationen bedarfsgerecht zur Verfügung gestellt werden. Das Informationsmodell stellt hierzu das Grundgerüst für die Entwicklung eines rechnergestützten Nachverfolgungssystems dar. Dem Anwender soll über dieses System die Identifikation und Nachverfolgung von additiv gefertigten Bauteilen ermöglicht werden. Anhand von eindeutig zu vergebenden Identifikationsnummern sollen relevante aggregierte Informationen aus den einzelnen Prozessschritten bzw. -phasen visualisiert werden. Ziel ist es auch, höherwertige Informationen zu generieren

und zur Verfügung zu stellen. Dies erfordert die Betrachtung einer bauteilindividuellen Kosten- und Energiebedarfsermittlung. Ferner können hierdurch Wechselwirkungen zwischen Bauteilversagen in der Nutzung und dem Pre-Prozess untersucht werden. Neben dem Nachverfolgungssystem zur Bauteilidentifikation soll ein rechnergestütztes Assistenzsystem zur Bauteilkennzeichnung basierend auf der entwickelten Methode bereitgestellt werden. Dieses Werkzeug wird in die erweiterte Prozesskette integriert und steht somit dem Mitarbeiter im Pre-Prozess zur Verfügung.

Diese primären Zielstellungen zur Erreichung des Gesamtziels dieser Dissertation, der Bereitstellung einer bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation, führen zu verschiedenen wissenschaftlichen Fragestellungen. Diese Fragestellungen werden in den nachfolgenden Kapiteln wissenschaftlich beleuchtet und in Form von Methoden und Ansätzen beantwortet.

1.3 Aufbau der Dissertation

Die vorliegende Dissertation ist in acht Hauptkapitel gegliedert, die die formulierten Zielstellungen behandeln. Nach der thematischen Einführung in diesem Kapitel werden in Kapitel 2 die Grundlagen und der Stand der Technik beschrieben. Dies umfasst zu Anfang die Herleitung und Beschreibung der relevanten Prozesskette zur bauteilindividuellen Additiven Fertigung. Außerdem werden die Prinzipien zu additiven Fertigungsverfahren sowie in Frage kommende Nachbearbeitungsverfahren betrachtet. Aufbauend auf den Verfahrensbeschreibungen werden Auswirkungen dieser auf den Pre-Prozess herausgearbeitet. Darüber hinaus werden ausführlich Kennzeichnungsträger und Identifikatorarten analysiert und beschrieben. Im letzten Teil von Kapitel 2 werden ausgewählte Forschungsarbeiten und industrielle Umsetzungen vorgestellt und diskutiert.

Basierend auf dem Stand der Technik werden in Kapitel 3 Handlungsbedarfe sowie Zielstellungen an die vorliegende Dissertation herausgearbeitet. Aufbauend hierauf wird ein Anforderungsprofil definiert.

In Kapitel 4, dem Kern der Dissertation, wird das Konzept zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung entwickelt. Dies umfasst im Wesentlichen die Entwicklung der Methode zur Bauteilkennzeichnung, die Entwicklung des Informationsmodells sowie die Bereitstellung einer durchgängigen Identifikation.

Zur Überprüfung der Tragfähigkeit des entwickelten Konzeptes wird dieses prototypisch in Form einer Software-Applikation implementiert, siehe Kapitel 5. Diese

Implementierung dient als Basis für die Validierung und Verifikation in Kapitel 6. Hierfür werden repräsentativ ausgewählte kundenindividuelle Bauteile und Anforderungsprofile verwendet.

Nach einem Ausblick auf weitere Entwicklungs- und Forschungsarbeiten in Kapitel 7 schließt die Dissertation in Kapitel 8 mit einer Zusammenfassung.

2 Grundlagen und Stand der Technik

Zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung werden in diesem Kapitel die für die vorliegende Dissertation relevanten Grundlagen sowie der Stand der Technik und Forschung beschrieben. Zuerst wird die Prozesskette zur Additiven Fertigung und die Ausprägung dieser Prozesskette für die bauteilindividuelle Additive Fertigung vorgestellt. Darauf aufbauend werden die Grundlagen zu additiven Fertigungsverfahren und Nachbearbeitungsverfahren für die Additive Fertigung näher beschrieben. Ausgehend von diesen Verfahrensbeschreibungen werden deren Auswirkungen auf den Pre-Prozess in der bauteilindividuellen Additiven Fertigung betrachtet. Für die durchgängige Identifikation in der bauteilindividuellen Additiven Fertigung werden im Weiteren Ansätze und Lösungen für die Kennzeichnung und Identifikation im Allgemeinen und in Bezug auf die Additive Fertigung identifiziert. Im darauffolgenden Abschnitt werden der industrielle Stand der Technik und bestehende Forschungsarbeiten in Bezug auf die digitale Prozesskette zur Additiven Fertigung dargelegt. Das Kapitel endet mit einem Fazit, in dem wissenschaftliche Lücken aufgezeigt werden. Basierend auf diesen wissenschaftlichen Lücken werden Potentiale für die bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Identifikation für die Additive Fertigung abgeleitet.

2.1 Prozesskette zur Additiven Fertigung

Additive Fertigungsverfahren ermöglichen das direkte Fertigen von Bauteilen basierend auf digitalen Daten ohne die Verwendung formgebender Werkzeuge [41; 208]. Diese Vorgehensweise ist neben der subtraktiven und formativen Geometrierzeugung eine weiteres Verfahren in der Fertigungstechnik Bauteile zu erzeugen [54; 105]. Subtraktive Fertigungsverfahren tragen unter Zuhilfenahme von Werkzeugen definierte Werkstückbereiche ab, um hierdurch die Fertigteilgeometrie zu erzeugen. Beispiele für subtraktive Verfahren sind Fräsen, Drehen oder Bohren [153]. Formative Fertigungsverfahren erzeugen die gewünschte Bauteilgestalt durch Umformen eines Halbzeuges, beispielsweise durch Schmieden oder Tiefziehen [110; 152]. Nach DIN 8580 lassen sich additive Fertigungsverfahren in die Hauptgruppe Urformen eingliedern [74]. Per Definition wird unter Urformen die Schaffung eines festen Körpers aus formlosen Stoffen (flüssig, pulvrig, plastisch)

verstanden [74; 208]. Allerdings lassen sich additive Fertigungsverfahren aufgrund der vielfältigen Ausprägungen nicht immer eindeutig in die Hauptgruppe des Urformens eingliedern. Je nach Verfahren kann auch eine Eingliederung in Hauptgruppe 5 nach DIN 8580 erfolgen, dem Beschichten [110]. Die für diese Dissertation gewählte Klassifizierung additive Fertigungsverfahren berücksichtigt die Eingliederung in beide Hauptgruppen, siehe Abbildung 2-4. Durch diese Klassifizierung der additiven Fertigungsverfahren lassen sich diese von konventionellen Fertigungsverfahren eindeutig abgrenzen. Darüber hinaus sind die Begrifflichkeiten *Additive Fertigung* und das englischsprachige Pendant *Additive Manufacturing* in der VDI RICHTLINIE 3405 [242] bzw. in dem ISO/ASTM STANDARD 52900:2015 beschrieben [29]. In erstgenannter Richtlinie werden auch die Abgrenzungen zu weiteren bestehenden Begrifflichkeiten wie *Rapid Prototyping*, *Rapid Tooling*, *Rapid Manufacturing* oder *Generative Fertigung* aufgezeigt.

Die Prozesskette zur Additiven Fertigung ist in ihrer Ausprägung verfahrensabhängig und anwendungsfallspezifisch. Für die vorliegende Dissertation wird im Folgenden aufbauend auf gängigen Prozesskettenbeschreibungen die Prozesskette zur bauteilindividuellen Additiven Fertigung hergeleitet und definiert.

Trotz verfahrens- und anwendungsfallabhängigen Betrachtungsweisen kann der Prozess zur Additiven Fertigung nach VDI 3404 [238] vereinfacht in drei allgemeingültige Schritte untergliedert werden, siehe Abbildung 2-1. Der Prozess beginnt mit der Erzeugung rechnerinterner 3D-CAD-Daten. Darauf aufbauend wird eine 2,5D-Schichtdatenrepräsentation der Geometrie erzeugt, siehe Abbildung 2-1 [172]. Die hier erzeugten Schichtdaten werden im Anschluss verfahrensabhängig in einem schichtweisen Bauprozess gefertigt und an erforderliche Nachbearbeitungsschritte weitergegeben [256].

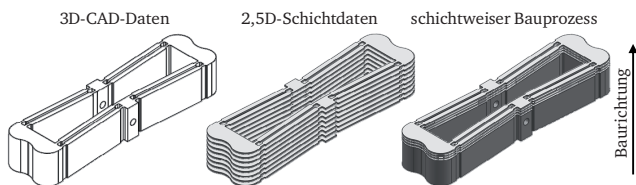


Abbildung 2-1: Prozess der Additiven Fertigung, vereinfachte Darstellung in Anlehnung an [238]

Eine detailliertere Betrachtungsweise der Prozesskette liefert Gibson [112]. Die Prozesskette der Additiven Fertigung, ausgehend vom rechnerinternen 3D-CAD-Modell, über die Bauprozessvorbereitung, dem physischen Bauprozess selbst, bis

hin zum Post-Prozess und der Produktnutzung wird hier in acht Prozessschritten gegliedert [23; 112], siehe Abbildung 2-2.

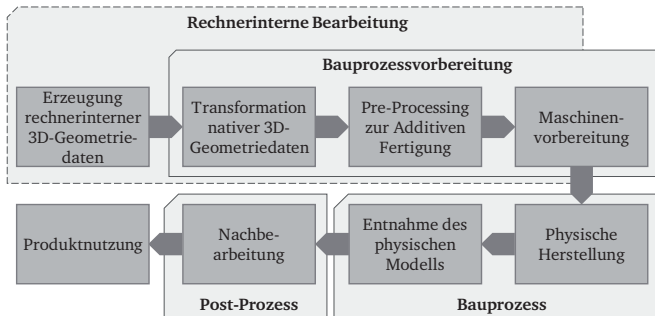


Abbildung 2-2: Prozesskette zur Additiven Fertigung in Anlehnung an Gibson [18; 112]

Der erste Prozessschritt beinhaltet die Erstellung eines rechnerinternen, nativen 3D-Geometriemodells in einem CAD-System. Ergebnis sind die für die Fertigung notwendigen Geometriedaten [256]. Analog zur nativen Erzeugung dieser 3D-Geometriedaten im CAD-System können die erforderlichen Geometriedaten über die Methoden des Reverse Engineering erzeugt und verarbeitet werden [90; 192]. Im nächsten Prozessschritt werden die erzeugten Geometriedaten mittels der mathematischen Methode der Triangulation approximiert. Ergebnis dieser Transformation ist in den meisten Anwendungsfällen das sogenannte STL (Standard Tessellation Language) Format. Dieses bildet in der industriellen Anwendung den De-facto-Standard [19; 97; 143]. Der dritte Prozessschritt umfasst die Manipulation der approximierten Geometriedaten. Die Manipulation umfasst die Baugröße, Orientierung und Positionierung im Bauraum, Festlegung von verfahrensabhängigen Stützstrukturen und Definition der Schichtparameter [112; 196]. Anschließend werden diese Informationen an die Fertigungsanlage weitergeben und die Anlage für den Bauprozess vorbereitet und konfiguriert. Die Bauteile werden abschließend gefertigt, nachbearbeitet und in ihre Nutzung übergeben [112].

Wird die Prozesskettendefinition nach Gibson [112] auf den Anwendungsfall der bauteilindividuellen Additiven Fertigung aus Sicht des Fertigungsunternehmens selbst übertragen, so verschieben sich die Systemgrenzen und die Prozesskette kann durch weitere Prozessschritte modifiziert werden. Zur Modellierung der für die vorliegende Dissertation relevanten Prozesskettendefinition wird sich an der VDI 3405 [242] orientiert. Hier wird der gesamte Prozessablauf in drei wesent-

liche Schritte unterteilt, den Pre-Prozess, In-Prozess und Post-Prozess. Diese Gliederung wird im Folgenden auf die Prozesskette zur bauteilindividuellen Additiven Fertigung angewendet, siehe Abbildung 2-3.

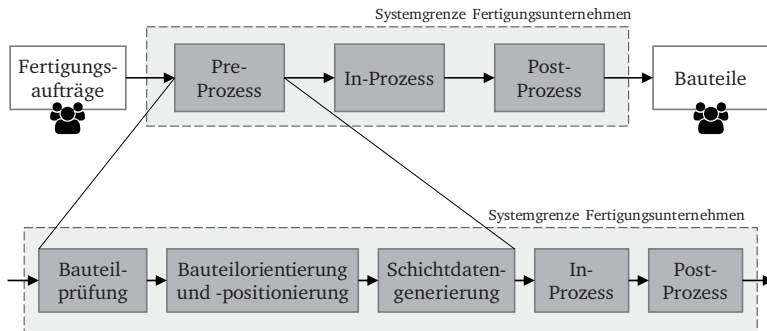


Abbildung 2-3: Prozesskette zur bauteilindividuellen Additiven Fertigung (aufbauend auf [22; 242])

Die Prozesskette zur bauteilindividuellen Additiven Fertigung beginnt mit dem Eingang von Fertigungsaufträgen. Diese Fertigungsaufträge enthalten die 3D-Geometrieinformationen in Form eines 3D-CAD-Modells [22]. Nach Erhalt dieser Daten beginnt der Pre-Prozess. Der Pre-Prozess beschreibt die erforderlichen Operationen, welche notwendig sind, bevor das Bauteil in der additiven Fertigungsanlage gefertigt werden kann [242]. Hierzu zählen im Einzelnen die Prüfung der zu fertigenden Bauteilgeometrie, die Orientierung der Bauteilgeometrie sowie deren Positionierung im Bauraum und die abschließende Schichtdatengenerierung. Je nach Fertigungsverfahren sind Stützstrukturen für die Additive Fertigung erforderlich, diese werden vor der Schichtdatengenerierung den zu fertigenden Bauteilen hinzugefügt [135; 144]. Wie diese Detaillierung des Pre-Prozesses zeigt, wird die Prozesskette nach Gibson (siehe Abbildung 2-2) um die Prozessschritte zur rechnerinternen 3D-Geometrieverarbeitung sowie deren Transformation verkürzt. Diese Minimierung ist nicht als Eliminierung zu verstehen, es findet lediglich die Verlagerung dieser Prozessschritte außerhalb der Systemgrenze zum Kunden statt. Dafür wird die Prozesskette zur bauteilindividuellen Additiven Fertigung gegenüber der Notation nach Gibson um den Prozessschritt Bauteilprüfung erweitert. Nachdem der Pre-Prozess durchlaufen ist, findet der In-Prozess statt. Hier werden die vom Pre-Prozess definierten Fertigungsoperationen von einer additiven Fertigungsanlage ausgeführt. Ferner werden hier auch die Maschinenvorbereitungen und die erforderlichen Arbeitsschritte zum Entpacken oder Entneh-

men der additiv gefertigten Bauteile durchgeführt [242]. Im Anschluss an die Bauteilentnahme werden im Post-Prozess die erforderlichen Arbeitsschritte am Bauteil zum Erfüllen der Anforderungen durchgeführt. Hierzu zählen beispielsweise das Entfernen von Pulverrückständen oder Stützstrukturen [242]. Weitere nachgelagerte anwendungsspezifische Prozesse werden ebenfalls in den Post-Prozess eingruppiert. Hierfür können alle konventionellen Fertigungsverfahren zum Einsatz kommen, siehe DIN 8580 [74]. Nach Beendigung des Post-Prozesses werden die Bauteile an den Kunden weitergeben.

Die für die vorliegende Dissertation relevante Prozesskette lässt sich demnach in drei wesentliche Prozessschritte gliedern. Die nähere Betrachtung des Pre-Prozesses zeigt auf, dass zur Durchführung die Prozessschritte der Bauteilprüfung, der Bauteilorientierung und -positionierung sowie zur Stützstruktur- und Schichtdatengenerierung erforderlich sind. Für die gesamte weitere Analyse und Betrachtung wird die beschriebene Prozesskette zur bauteilindividuellen Additiven Fertigung nach Abbildung 2-3 verwendet. In den folgenden Kapiteln werden neben Anwendung findenden additiven Fertigungsverfahren für den In-Prozess und Nachbearbeitungsverfahren für den Post-Prozess ebenfalls Auswirkungen dieser Verfahren auf den Pre-Prozess vorgestellt. Hier werden die einzelnen Pre-Prozessschritte nochmals detailliert beschrieben.

2.2 Additive Fertigungsverfahren

Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Dissertation ist neben der bauteilindividuellen auch die verfahrensspezifische Identifikation für die Additive Fertigung. In diesem Kapitel werden die im Rahmen dieser Dissertation relevanten additiven Fertigungsverfahren näher beschrieben und auf weitere Verfahren verwiesen.

Abbildung 2-4 zeigt die Klassifizierung von additiven Fertigungsverfahren. In Anlehnung an DIN 8580 [74] werden diese nach ihrem Aggregatzustand des Ausgangsmaterial eingruppiert. Hier wird zwischen festem, flüssigem und gasförmigem Aggregatzustand differenziert [105]. Diese Aggregatzustände können im Weiteren in die jeweilige Erscheinungsform unterschieden werden, beispielsweise die Verwendung von Draht. Um den Ausgangswerkstoff additiv verarbeiten zu können, liegen den Verfahren physikalische Prinzipien zu Grunde. Zu diesen werden in Abbildung 2-4 die additiven Fertigungsverfahren letztlich zugeordnet [19]. Die Klassifizierung wird durch verwendbare Materialien komplettiert [28; 160].

Die gezeigte Klassifizierung hat hinsichtlich der aufgeführten additiven Fertigungsverfahren nicht den Anspruch auf Vollständigkeit. Ebenfalls wird an dieser

Stelle nicht auf Verfahren eingegangen, welche auf einem gasförmigen Aggregatzustand aufbauen. Hierzu zählt das dreidimensionale Aufbringen von Schichten entweder durch eine chemische Reaktion oder aus der Dampfphase [41]. An dieser Stelle sei auf weiterführende Literatur verwiesen [88; 136; 148; 175; 217].

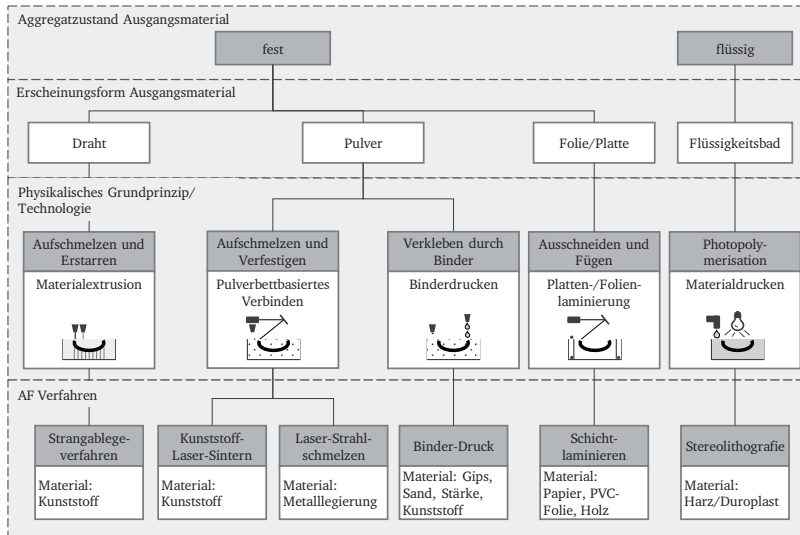


Abbildung 2-4: Klassifizierung additiver Fertigungsverfahren (In Anlehnung an [5; 109; 110; 160])

In den nachfolgenden Kapiteln werden die für die Dissertation relevanten additiven Fertigungsverfahren beschrieben. Ziel ist es, aufbauend auf den Ausführungen Auswirkungen auf den Pre-Prozess abzuleiten, siehe Kapitel 2.4. Für detailliertere Verfahrensbeschreibungen sei auf [110; 150; 242; 256] verwiesen.

2.2.1 Strangablageverfahren

Das Strangablageverfahren (engl. Fused Layer Modelling oder Fused Deposition Modelling™ (FDM) [59]) verwendet strangförmige Ausgangswerkstoffe aus thermoplastischen Kunststoffen [157]. Abbildung 2-5 zeigt das Verfahrensprinzip. Zur Herstellung von Bauteilen werden je nach Geometrie Stützstrukturen beim Bauprozess benötigt. Daher werden in industriellen Anlagen zwei verschiedene Ausgangsstoffe verwendet. Zum einen wird das Modellmaterial und zum anderen das Stützmaterial genutzt, welches im Nachgang wieder entfernt wird [110]. Zur Ver-

arbeitung der beiden Ausgangsstoffe werden zwei separate beheizte Düsen verwendet [251]. Diese Düsen ziehen die Ausgangswerkstoffe ein und erhitzen sie bis knapp unterhalb der jeweiligen Schmelztemperatur. Für eine nahezu konstante Temperaturverteilung im Bauraum wird dieser durch Heizdüsen kontinuierlich beheizt [47]. Die Düsen werden in x-y-Richtung verfahren und legen dabei den Werkstoff im teigförmigen Zustand strangförmig auf der Bauplatte ab [7; 110]. Sind basierend auf den erzeugten Schichtinformationen die Düsenwege abgefahren und das erforderliche Material abgelegt, so wird die Bauplattform mit Hubtisch um die eingestellte Schichtstärke in z-Richtung herabgefahren [117]. Die iterative Abfolge von Auftragen des Materials durch die Düsen und dem darauffolgenden Absenken der Bauplattform endet, wenn alle Schichten erzeugt sind.

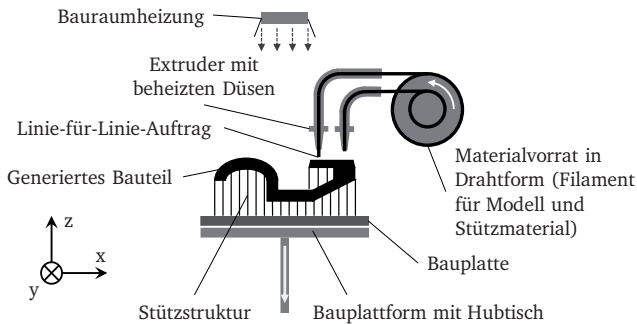


Abbildung 2-5: Verfahrensprinzip: Strangablegeverfahren (in Anlehnung an [238; 242])

Typische Verfahrens- bzw. Maschinenparameter beim Strangablegeverfahren sind die Verfahrgeschwindigkeiten des Extruders und die Vorschubgeschwindigkeit des Filaments, die Schichtstärke sowie Düsen- und Heizbett- bzw. Bauraumtemperatur. Diese Parameter werden in der Schichtdatengenerierung festgelegt, siehe Kapitel 2.4.3. Wie bereits in Abbildung 2-4 zu sehen ist, werden als Ausgangsmaterial Filamente aus Kunststoff verwendet. Hier können düsenabhängig unterschiedliche Materialdurchmesser zum Einsatz kommen. Beim Filament handelt es sich beispielsweise um amorphe Thermoplaste (ABS, PC, PLA oder PI) [19]. Heutige Fertigungsanlagen für das Strangablegeverfahren erreichen abhängig vom Düsendurchmesser Bauteilgenauigkeiten von $\pm 0,12$ bis $0,33$ mm [41; 110]. Ein Nachteil von Bauteilen, die mittels des Strangablegeverfahren erzeugt werden, ist die aufwendige Nachbearbeitung der Oberflächen, sofern qualitativ hochwertige Ergebnisse erforderlich sind [21; 107], siehe hierzu Kapitel 2.3.

2.2.2 Kunststoff-Laser-Sintern

Das Kunststoff-Laser-Sintern (auch unter Selective Laser SinteringTM (SLSTM) oder Polymer-Laserstrahlschmelzen bekannt [19]) verwendet pulverförmige Kunststoffe als Ausgangswerkstoff. In einem ersten Schritt wird das Pulver in Form einer Schicht in der Bauebene abgelegt, siehe auch Abbildung 2-6. Die Werkstoffzufuhr übernimmt ein Beschichter, dieser verwendet das Pulver aus dem Vorratsbehälter und führt es schichtweise dem Bauraum hinzu. Der Beschichter legt das zu sinternde Pulver ab, während er in x-Richtung über die Bauebene fährt. Mittels Abstreifern am Beschichter werden überschüssige Pulvermengen abgetragen und in den Überlaufbehälter geschoben [139].

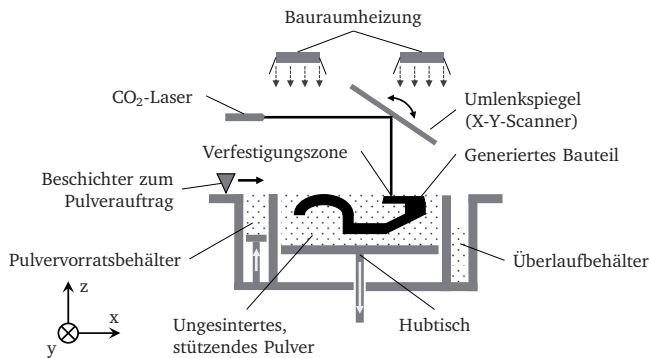


Abbildung 2-6: Verfahrensprinzip: Kunststoff-Laser-Sintern (in Anlehnung an [238; 242])

Aufbauend auf der Schichtablage beginnt die eigentliche Bauteilerzeugung. Die abgelegte Pulverschicht wird durch Infrarot-Heizstrahler im Bauraum erwärmt. Dabei liegt die Vorwärmtemperatur wenige Grad Celsius unterhalb der Schmelztemperatur des Ausgangswerkstoffes [7]. Diese Vorwärmung führt zum einen zur Reduzierung der benötigten Energiemenge, welche beim Sintern erforderlich ist, und zum anderen wirkt die Vorwärmung möglichem Bauteilverzug entgegen [139]. Die Energiezufuhr erfolgt über einen CO₂-Laser. Ein Umlenkspiegel lenkt den Laserstrahl nach vorgegebenen Werten bauteilspezifisch um und erzeugt somit einen Fokuspunkt, der die Geometrie der Bauteilschicht in der Bauebene abfährt. Durch diese Belichtung des Pulvers und die dadurch eingebrachte Energie schmelzen die Pulverpartikel und kühlen durch die Wärmeleitung schnell wieder ab. Das Ergebnis ist eine erstarrte Schicht. Ist die jeweilige Schicht gefertigt, wird der Hubtisch um eine Schichtstärke in negative z-Richtung herabgefahren und der Beschichter trägt erneut Pulvermaterial auf. Während des Bauprozesses dient das

nicht-gesinterte Pulver als Stützmaterial für das generierte Bauteil. Es werden demnach keine zusätzlichen Stützkonstruktionen bei diesem Verfahren benötigt. Diese Arbeitsschritte werden iterativ wiederholt, bis das Bauteil komplett gefertigt ist. [110; 139; 208; 240]

Verfahrensspezifische Parameter sind beim Kunststoff-Laser-Sintern beispielsweise die Laserleistung, die Scangeschwindigkeit, die Schichtstärke oder der Spurabstand. Diese Parameter werden in der Schichtdatengenerierung festgelegt, siehe Kapitel 2.4.3 [159]. Als Ausgangswerkstoffe können verschiedene Kunststoffe verwendet werden. Im Rahmen der Dissertation wird sich auf teilkristalline Thermoplaste beschränkt, beispielsweise PA 12 oder PA 11 [19]. Diese schmelzen im Gegensatz zu amorphen Kunststoffen wie Polystyrol vollständig auf und erhalten somit glattere Oberflächen, was eine größere Relevanz für den Einsatz in der bauteilindividuellen Additiven Fertigung darstellt [120]. Allerdings kann das Aufschmelzen der Partikel aufgrund von Oberflächenspannungen zu Grübchenbildungen führen, was zu rauere Oberflächen verursacht [247]. Dies zieht Nachbearbeitungsverfahren nach sich, siehe hierzu Kapitel 2.3. Heutige Fertigungsanlagen erreichen Bauteilgenauigkeiten von $\pm 0,15$ bis $0,2$ mm bei erreichbaren minimalen Wandstärken von $0,5$ mm [112; 120; 234].

2.2.3 Laser-Strahlschmelzen

Für Laser-Strahlschmelzen werden in der Literatur und Industrie differente Begriffe synonym verwendet, hierzu zählen Selective Laser MeltingTM (SLM), Direct Metal Laser SinteringTM (DMLSTM), LaserCusingTM, Laser Metal FusionTM (LMFTM) oder Direct Metal PrintingTM (DMPTM) [19]. Alle diese Verfahren verwenden pulverförmige Ausgangswerkstoffe aus Metall [60]. Das Verfahrensprinzip zum Laser-Strahlschmelzen zeigt Abbildung 2-7. Im ersten Arbeitsschritt wird das zu verarbeitende Pulver durch einen Beschichter aufgetragen [64]. Der Beschichter nimmt temporär das Pulver auf und verteilt es auf der Ebene, indem er in x-Richtung verfährt [7]. Ähnlich wie beim Kunststoff-Laser-Sintern (siehe Kapitel 2.2.2) werden überschüssige Pulvermengen durch Gummilippen oder Keramikwischer abgetragen, hierdurch entstehen definierte Schichtdicken [110]. Darauf aufbauend startet die Generierung des Bauteils. Die benötigte thermische Energie wird durch einen Faser-Laser erzeugt und über einen Umlenkspiegel punktuell in die Schicht eingebracht. Dieser Fokuspunkt fährt die vorgegebene Geometrie der Bauteilschicht ab und belichtet somit das Pulver. Die eingetragene Energie schmilzt das Pulver, womit sich die Partikel zusammen verbinden. Nach dem Abkühlen

entstehen ein festes Gefüge und eine Bauteilschicht ist fertig gestellt. Nicht aufgeschmolzene Pulverpartikel verbleiben im Ausgangszustand im Bauraum und umgeben das Bauteil. Die Ausgangswerkstoffe werden in diesen Prozessschritten auf Temperaturen von 100°C bis 200°C vorgewärmt, dies erfolgt hier ebenfalls wie beim Kunststoff-Laser-Sintern durch eine Bauraumheizung, siehe Abbildung 2-7. Diese Vorwärmtemperatur liegt deutlich unter der Schmelztemperatur des metallischen Ausgangswerkstoffes, was den Eintrag von hohen Energiemengen durch den Laser zur Verfestigung des Materials nach sich zieht. Dies hat große Temperaturgradienten zur Folge, was zu Eigenspannungen im generierten Bauteil führt. Zur Kompensation der Eigenspannungen werden beim Laser-Strahlschmelzen solide Stützstrukturen verwendet. Die beschriebenen Arbeitsschritte werden iterativ wiederholt, bis das Bauteil komplett gefertigt ist. [7; 120; 196]

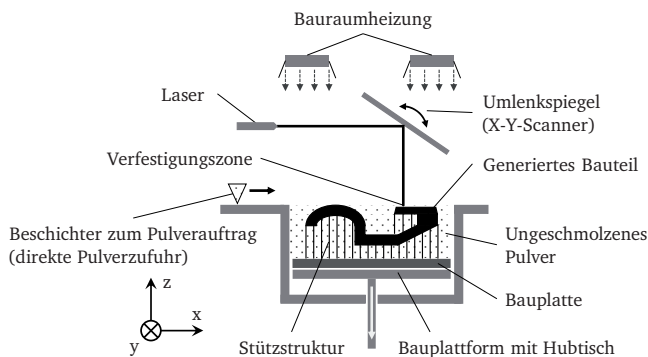


Abbildung 2-7: Verfahrensprinzip: Laser-Strahlschmelzen (in Anlehnung an [238; 242])

Analog zum Kunststoff-Laser-Sintern werden hier verfahrens- und maschinenspezifische Parameter für die Fertigung benötigt. Die Einstellung von diesen Parametern für das Laser-Strahlschmelzen erfolgt in der Schichtdatengenerierung, siehe Kapitel 2.4.3. Die im Wesentlichen einzustellenden Parameter sind Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Scanstrategie [224]. Beim Laser-Strahlschmelzen werden verschiedene Stähle und Edelmetalle, Titan-Legierungen, Aluminium-Legierungen und Kobalt-Chrom-Legierungen verwendet. Ähnlich wie beim Kunststoff-Laser-Sintern entstehen beim Schmelzprozess raue Oberflächen, welche eine abtragende oder auftragende Nachbearbeitung erfordern. Ferner müssen Metallbauteile thermischen Nachbearbeitungsverfahren unterzogen werden, um Eigenspannungen zu verringern oder Anforderungen an die Bauteilhärte zu erfüllen. [239; 244]

2.2.4 Weitere additive Fertigungsverfahren

Neben den beschriebenen additiven Fertigungsverfahren existieren eine Vielzahl an weiteren Verfahren. Der Vollständigkeit halber sollen an dieser Stelle kurz wichtige Verfahren aufgezählt werden, als weitere führende Literatur sei [19; 97; 110; 234] empfohlen:

- **Binder-Druck** Verfahren; Verkleben von Pulver mit flüssigem Binder. Synonyme: 3D-Printing™, Binder 3D printing, VoxelJet™, ZCorp™
- **Schichtlaminieren**; Verleimen von Papier oder Schmelzkleben von Folie. Synonyme: Laminated Object Modelling™, Layer Laminated Manufacturing, Sheet Lamination
- **Stereolithografie**; Bauteilgenerierung durch Photopolymerisation mittels Laserstrahl. Synonyme: Stereolithography™ (SLA)
- **Harz-Druck**; Bauteilgenerierung durch Photopolymerisation mittels Inkjetdruckkopf. Synonyme: Objet™, Polyjet™ Modelling
- **Elektronenstrahlschmelzen**; Schmelzschweißen durch fokussierten Elektronenstrahl. Synonyme: Electron Beam Melting™

2.3 Nachbearbeitungsverfahren für die Additive Fertigung

Zur verfahrensspezifischen Betrachtung werden in diesem Kapitel die erforderlichen Nachbearbeitungsverfahren für die Additive Fertigung diskutiert. Die Nachbearbeitungsverfahren lassen sich in zwei wesentliche Gruppen gliedern. Zum einen sind dies Arbeitsschritte, die nach der Entnahme aus der Fertigungsanlage verfahrensspezifisch notwendig sind (siehe auch Kapitel 2.1). Hierzu zählen beispielsweise die Entfernung von Pulverrückständen oder Stützstrukturen sowie zwingend erforderliche Schritte zum Erreichen der technologischen Bauteileigenschaften [238; 242]. Zum anderen zählen zu den Nachbearbeitungsverfahren anwendungsspezifische Prozesse. Diese Schritte sind notwendig, um ausgewählte Eigenschaften zu erzielen, verbessern oder weitere Ausprägungen in die Bauteile einzubringen [242]. Dabei sollen solche Nachbearbeitungsverfahren Anforderungen an die Oberflächengüte, physikalische und mechanische Eigenschaften, Haptik und Lebensdauererweiterungen genügen [238]. Die hier zum Einsatz kommenden Technologien sind konventionelle Fertigungsverfahren und nach DIN 8580 definiert [74]. In dieser DIN-Norm wird eine Übersicht über die Einteilung von Fertigungsverfahren in Hauptgruppen, Gruppen und Untergruppen gegeben. Dabei werden lediglich die hier Anwendung findenden Gruppen und Untergruppen aufgezeigt, für weitere Informationen sei auf [53; 74; 128] verwiesen.

Für die vorliegende Dissertation werden im Folgenden in Frage kommende Nachbearbeitungsverfahren für die Fertigungsverfahren Strangablegeverfahren, Kunststoff-Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen beschrieben, um hierauf aufbauend Auswirkungen auf den Pre-Prozess und eine durchgängige Identifikation abzuleiten. Abschließend findet eine tabellarische Zusammenfassung der vorgestellten Nachbearbeitungsverfahren statt, siehe Tabelle 2-1.

2.3.1 Verfahrensspezifische Nachbearbeitungsverfahren

Nach dem Herstellungsprozess beim *Strangablegeverfahren* (siehe Kapitel 2.2.1) müssen Stützstrukturen entfernt werden. Diese Entfernung erfolgt bei leicht zugänglichen Stellen oder bei der Verwendung von Modellmaterial als Stützmaterial durch mechanische Arbeitsschritte, beispielsweise Abtrennen durch Schneiden, Sägen oder Feilen. Bei der Verwendung von auswaschbarem Stützmaterial wird dieses in einem Wasserbad ausgewaschen. Der Löseprozess wird durch den Einsatz von Laugen und mit Hilfe von Umwälzpumpen in einem Wasserbad beschleunigt. Das derart gereinigte und von Stützen entfernte Bauteil kann anschließend anwendungsspezifisch nachbearbeitet werden. [108; 110; 112; 182; 183; 242]

Nach dem Bauprozess sind die gefertigten Bauteile beim *Kunststoff-Laser-Sintern* (siehe Kapitel 2.2.2) in einem Pulverkuchen eingeschlossen. In der Regel arbeiten die Verfahren zum Versintern von Kunststoffen bei Temperaturen zwischen 170°C und 210°C. Aufgrund der schlechten Wärmeleitung von Kunststoffen muss der Pulverkuchen die gleiche Zeit Abkühlen wie er auch zur gesamten Herstellung benötigt hat. Danach werden die Bauteile manuell aus diesem Kuchen ausgegraben. Hierzu werden Siebeinrichtungen verwendet und mit Druckluft gearbeitet [110]. Nachdem die Teile gesäubert sind und einzeln vorliegen, können weitere anwendungsspezifische Nachbearbeitungsverfahren durchgeführt werden. [37; 200; 209; 240]

Ähnlich wie beim Kunststoff-Laser-Sintern müssen die gefertigten Bauteile beim *Laser-Strahlschmelzen* (siehe Kapitel 2.2.3) von überschüssigem Pulver befreit werden. Da hier jedoch die Prozesskammer, also auch das nicht geschmolzene Pulver, nahezu kalt bleiben, kann auf einen langen Auskühlprozess verzichtet werden, ausgenommen es wird mit einer Vorheizung gearbeitet [110]. Beim Laser-Strahlschmelzen müssen im Post-Prozess die gefertigten Stützkonstruktionen mechanisch, beispielsweise durch manuelles Entfernen oder Sägen, entfernt werden. Je nachdem, welche anwendungsspezifischen Prozesse folgen, geschieht dies direkt im Anschluss oder die Bauteile werden samt Stützen und Bauplattform für die anstehende Nachbearbeitung verwendet. [42; 110; 239; 244]

2.3.2 Anwendungsspezifische Nachbearbeitungsverfahren

Zur anwendungsspezifischen Nachbearbeitung additiv gefertigter Bauteile eignen sich diverse Fertigungsverfahren, welche die Bauteileigenschaften in ihren Eigenschaften verbessern [241]. Diese Folgeprozesse lassen sich im Wesentlichen in *abtragende*, *auftragende* und *thermische Verfahren* einteilen [240]. Im Folgenden werden typische und für die vorliegende Dissertation relevante Verfahren kurz beschrieben.

2.3.2.1 Abtragende Nachbearbeitungsverfahren

Unter abtragenden Nachbearbeitungsverfahren werden hier nach DIN 8580 Verfahren verstanden, die der Hauptgruppe *Trennen* oder *Umformen*, siehe Erläuterung zum Verfahren *Strahlen*, zugeordnet werden können [74]. Nachfolgend sollen die relevanten Nachbearbeitungsverfahren *Strahlen* und *Geleitschleifen* beschrieben werden [76]. Neben diesen beiden Verfahren ist u. a. das Fräsen ein relevanter Vertreter der abtragenden Nachbearbeitungsverfahren [43; 81; 185; 242]. Neben dem Fräsen finden je nach Bauteilgeometrie auch weitere spanende Fertigungsverfahren in der Nachbearbeitung von additiv gefertigten Bauteilen Anwendung, beispielsweise Drehen, weitere Schleifverfahren, Hobeln oder Bohren [77; 78; 80; 82]. Diese abtragenden Verfahren werden in der vorliegenden Dissertation jedoch nicht explizit berücksichtigt. Die Begründung liegt in der örtlich lokalen Anwendung dieser Verfahren am Bauteil. Es werden nur Nachbearbeitungsverfahren berücksichtigt, welche das gesamte Bauteil und nicht nur einzelne Flächen bzw. Bereiche betreffen. Werden Verfahren wie Fräsen oder Drehen am Bauteil durchgeführt, ist dies vom Kunden am Bauteil zu verorten und dem Fertiger als Information bereitzustellen. Diese Bereiche kommen dann für eine Kennzeichnung nicht in Frage.

Strahlen

Per Definition zählt das Strahlen nach DIN 8580 zum Umformen [74]. Da es aber in den nachgelagerten Prozessen zur Additiven Fertigung u. a. zum Entgraten verwendet wird, findet hier die Eingliederung in die abtragenden Nachbearbeitungsverfahren statt. Beim Strahlen wird ein Strahlmittel (körnige Materialien) in einer Strahlanlage beschleunigt und gezielt auf die Bauteiloberflächen gelenkt. Neben dem bereits genannten Entgraten dient das Strahlen additiv gefertigter Bauteile zur Verbesserung der Oberfläche, was letztlich zur Vorbereitung weiterführender Nachbearbeitungen dient. In DIN 8200 werden die differenten Strahlungsarten klassifiziert. Das hier betrachtete Glättstrahlen zählt zusammen mit

dem Polier, Rau- und Mattierstrahlen zur Untergruppe des Oberflächenveredelungsstrahlens [68; 74; 139]. Die erreichbare Oberflächenqualität hängt vornehmlich von der eingesetzten Strahlmittelsorte, dem Strahlmitteltreffwinkel, der Strahlmittelaufreffgeschwindigkeit, dem Strahlabstand, dem Auftreffwinkel und der Einwirkungsdauer ab [68; 177]. Weitere Einflussgrößen sind die Strahlgutgeometrie und dessen Rauheitsprofil vor der Nachbearbeitung [151]. Ergebnis des Strahlens ist eine bessere Oberflächenrauigkeit des Bauteils und entgratete Bauteilkanten, dies kann auch je nach Strahlmittel und gewählter Verfahrensparameter zu leichten Formverlusten beispielsweise ungewollten Kantenverrundungen führen [44; 242].

Gleitschleifen

Gleitschleifen gehört nach DIN 8580 zu der Gruppe der spanenden Fertigungsverfahren und wird nach DIN 8589-17 zur Verfahrensgruppe *Gleitspanen* eingegliedert [74; 79]. Der Abtrag am Bauteil wird durch lose Schleifkörper, welche mit Schleifkörnern versetzt sind, erzielt. Die additiv gefertigten Bauteile werden zusammen mit den Schleifkörpern in einen Arbeitsbehälter gegeben und in einer undefinierten Relativbewegung zueinander bewegt [139]. Der Prozess erfolgt unter kontinuierlicher Zuführung von Wasser. Dieses kann zur Erreichung verschiedener Wirkungen, beispielsweise zum Binden und Abtragen des Abriebs oder zum Korrosionsschutz, eingesetzt werden [139; 190]. Die eingesetzten Verfahren werden in die Art der Relativbewegungserzeugung unterteilt. Hier wird zwischen Trommel-, Vibrations-, Fliehkraft- und Tauch-Gleitschleifen differenziert. Durch die heute verfügbaren Schleifanlagen kann eine nahezu automatisierte Nachbearbeitung erfolgen. Die eingesetzten Verfahren erzielen sehr gute Oberflächengüten haben allerdings zum Nachteil, dass gezielt vorgesehene scharfe Kanten an den Bauteilen verrundet werden. Des Weiteren besteht eine starke Abhängigkeit vom eingesetzten Schleifkörper zur erzielbaren Qualität. Je nach Bauteilgeometrie fehlt der Zugang für die Schleifkörper zu Bauteilflächen. Ferner können filigrane Strukturen durch die undefinierte Relativbewegung am Bauteil zerstört werden. [113; 229; 242]

2.3.2.2 Auftragende Nachbearbeitungsverfahren

Unter auftragenden Nachbearbeitungsverfahren werden nachfolgend Verfahren verstanden, welche sich in die Hauptgruppen *Fügen* und *Beschichten* nach DIN 8580 einteilen lassen. Fügen ist das auf Dauer angelegte Verbinden mehrerer Werkstücke miteinander oder das Zusammenbringen von Werkstücken mit formlosen Stoff. Beschichten ist das Fertigen durch Aufbringen einer fest anhaftenden

Schicht aus einem formlosem Stoff auf einem Bauteil bzw. einer Bauteilfläche. Für die Nachbearbeitung in der Additiven Fertigung sind insbesondere das *Infiltrieren* und das *Lackieren* von Bedeutung. [74]

Infiltrieren

Das Fertigungsverfahren Infiltration ist ein füllendes Verfahren. Es ist nach DIN 8580 in der Hauptgruppe *Fügen* und nach DIN 8593-2 der Unterhauptgruppe *Tränken* zugeordnet [74; 75]. Die Festigkeitseigenschaften von Bauteilen, die mittels pulververarbeitenden additiven Fertigungssystemen erstellt werden, entsprechen nicht direkt denen des Ausgangswerkstoffes selbst. Grund hierfür ist, dass die einzelnen Pulverkörner nur partielle Verbindungen miteinander eingehen, siehe Kapitel 2.2.2 [41]. Für höhere Festigkeiten werden die gesinterten Bauteile in der Nachbearbeitung infiltriert. In den verschiedenen Verfahrensvarianten des Infiltrierens dringen kriechfähige Harze, beispielsweise Epoxid-Harze, Acryl oder Polyurethan, in die Hohlräume zwischen den gesinterten Pulverteilchen ein [139; 231]. Ergebnis ist die Erhöhung der Verbindungsstellen zwischen den einzelnen Pulverteilchen, dies verleiht dem Bauteil die geforderten spezifischen Eigenschaften [99]. Das Eindringen des Infiltrats in das Bauteil wird in einem Bad durchgeführt. Dieser Prozess des Tränkens dauert so lange an, bis das Bauteil vollständig mit dem Infiltrationsmittel durchtränkt ist. Nimmt das Bauteil keine Flüssigkeit mehr auf, wird der Infiltrierungsvorgang beendet. Durch das Infiltrieren wird bei additiv gefertigten Bauteilen eine Verbesserung der Dichtheit des Bauteils sowie die Erhöhung der Verschleißbeständigkeit erzielt. Weiterhin verbessern sich die Oberflächenqualität sowie die mechanischen Eigenschaften. Diese angestrebten Verbesserungen sind stark abhängig vom eingesetzten Infiltrationsmittel [242].

Lackieren

Lackieren ist gemäß DIN 8580 der Hauptgruppe *Beschichten* und der Unterhauptgruppe *Beschichten aus dem flüssigen Zustand* zugeordnet [74]. Lackieren wird zur Erzeugung schützender oder dekorativer Beschichtungen für Bauteiloberflächen verwendet. Bei den aufzutragenden Lacken wird zwischen lösungsmittelhaltigen Lacken, wasserhaltigen Lacken und pulverförmigen Lacken differenziert [139]. Grundprinzip dieser Lackvarianten sind sogenannte Filmbildner, diese ermöglichen den Zusammenhalt der Beschichtung und die Haftung auf dem Untergrund. Weiterhin enthalten diese Pigmente zur Farbgebung des Lackes [139]. Die Auswahl der Lackvariante und des verwendeten Systems hat immensen Einfluss auf die spätere Oberflächenqualität [177]. Die eigentliche Lackierung, sprich der Auftrag der Lackschicht, erfolgt auf unterschiedliche Weisen. In der

Nachbearbeitung additiv gefertigter Bauteile ist hier das Lackieren durch Spritzen, Gießen, Rollen und Tauchen verbreitet [220]. Ähnlich wie beim Infiltrieren werden durch den Einsatz von Lackierungen die Oberflächenqualität und die Dichtigkeit des additiv gefertigten Bauteils verbessert. Auch hier ist die Qualität der Lackierung stark abhängig vom eingesetzten Lackmedium [242].

2.3.2.3 Thermische Nachbearbeitungsverfahren

Zur Verbesserung mechanischer Eigenschaften kommen in der Nachbearbeitung materialspezifische Wärmebehandlungen für metallverarbeitende Verfahren zum Einsatz [104; 176]. Diese lassen sich nach DIN 8580 in Glühen, Härten, Isothermisches Umwandeln, Anlassen, Vergüten, Tiefkühlen, thermochemisches Behandeln und Aushärten differenzieren [71]. Stellvertretend werden nachstehend das Glühen und Härten in Bezug auf die Additive Fertigung näher beleuchtet. Glühen und Härten werden nach DIN 8580 in die Hauptgruppe *Stoffeigenschaft ändern* und in die Gruppe *Wärmebehandeln* eingegliedert [71; 74].

Glühen

Der Schichtweise Aufbau bei der Additiven Fertigung kann in metallischen Bauteilen Eigenspannungen erzeugen und somit zum Bauteilverzug führen [145; 193]. Zur Vermeidung des Verzugs werden während des Bauprozesses Stützstrukturen mit gefertigt, siehe Kapitel 2.2.3. Nach dem Entfernen dieser Strukturen können sich die Bauteile in Abhängigkeit der Geometrie aufgrund von Eigenspannungen verziehen. Auch nach längerer Zeit können die thermischen Spannungen noch zu Formveränderungen führen. Weiterhin können im Bauteil Spannungsspitzen entstehen, welche die Dauerfestigkeit reduzieren. Durch Spannungsarmglühen können die Spannungen im additiv gefertigten Bauteil abgebaut und plastische Verformungen vermieden werden [36; 245]. Beim Spannungsarmglühen werden im Bauteil vorhandene Spannungen durch plastisches Fließen verringert. Der hierzu notwendige Glühvorgang dauert 1 bis 2 Stunden und wird bei Temperaturen von 450°C bis 650°C für Stahl durchgeführt [89; 178]. Neben dem Spannungsarmglühen findet auch das Lösungsglühen vermehrt Anwendung in der Additiven Fertigung [51]. Ziel des Lösungsglühen, auch Homogenisieren genannt, ist die Verminderung von Verformungen und die Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit nichtrostender Stähle durch gleichmäßige Verteilung der Legierungselemente im Gefüge [197; 218]. Die Lösungsglühtemperatur liegt bei Stählen zwischen 1050°C und 1250°C [118; 210]. Auch bei aushärtbaren Aluminiumlegierungen findet das Lösungsglühen Anwendung [218].

Härten

Beim Laser-Strahlschmelzen wird das Bauteilgefüge aufgrund der sehr geringen Schmelzbadabmessungen sowie der geringen Laserstrahl-Ausgangswerkstoff-Wechselwirkungszeit durch das schnelle Erstarren generiert. Die Abkühlgeschwindigkeiten bei der Erstarrung beträgt bis zu 104K/s [239]. Hierdurch entsteht ein Gefüge dessen Zustand samt mechanischer Eigenschaften nicht bekannt ist. Um das Gefüge in einen definierten Zustand zu überführen, ist eine Wärmebehandlung der Bauteile beispielsweise durch Härten erforderlich [239]. Härten besteht aus sequentiell ablaufenden Arbeitsschritten. Der Prozess beginnt mit dem Erwärmen des Bauteils auf die Härtetemperatur und wird anschließend auf dieser Temperatur gehalten. Anschließend findet das Abschrecken der Bauteile in Wasser oder Öl statt. Dieser Prozess führt zu einem harten aber spröden Gefüge, was Anlassen nach sich zieht. Nach dem Anlassen erhält der Stahl ein bestimmtes Maß an Zähigkeit [89]. Genaue Temperaturen und verfahrensspezifische Parameter sind [36; 89; 178] zu entnehmen.

2.3.3 Zusammenfassung der Nachbearbeitungsverfahren

Aus Gründen der Übersicht werden in Tabelle 2-1 die diskutierten Nachbearbeitungsverfahren zusammengefasst. Diese Zusammenfassung umfasst die Unterscheidung in verfahrens- und anwendungsspezifische Verfahren, betroffene additive Fertigungsverfahren sowie notwendige vorgelagerte Nachbearbeitungsverfahren zur Erreichung der geforderten Eigenschaften. Bei den vorgelagerten Nachbearbeitungsschritten wird sich auf die hier diskutierten Nachbearbeitungsverfahren beschränkt, siehe Kapitel 2.3.1 und 2.3.2.

Tabelle 2-1: Zusammenfassung der Nachbearbeitungsverfahren

NBV	Art	Betroffene AFV	Erforderliche NBV
Mechanisches Stützenentfernen	vs	FDM SLM	Druckluftreinigen (SLM)
Chemisches Stützenentfernen	vs	FDM	
Druckluftreinigen	vs	SLS SLM	
Strahlen	as	SLS SLM	Druckluftreinigen
Gleitschleifen	as	SLS SLM	Druckluftreinigen
Infiltrieren	as	SLS	Druckluftreinigen
Lackieren	as	FDM SLS SLM	Druckluftreinigen (SLS, SLM); Stützenentfernen (FDM, SLM); Gleitschleifen (SLS, SLM)
Glühen	as	SLM	Druckluftreinigen (evtl. Stützenentfernen)
Härten	as	SLM	Druckluftreinigen

Legende: NBV = Nachbearbeitungsverfahren; vs = verfahrensspezifisch; as = anwendungsspezifisch; AFV = Additives Fertigungsverfahren; FDM = Fused Deposition Modelling™ (Strangablegeverfahren); SLS = Selektives Lasersintern™ (Kunststoff-Laser-Sintern); SLM = Selective Laser Melting™ (Laser-Strahlschmelzen)

2.4 Auswirkungen von Fertigungs- und Nachbearbeitungsverfahren auf den Pre-Prozess

Für eine durchgängige Identifikation und Bereitstellung von bauteilindividuellen Informationen müssen letztere in allen Prozessschritten der Prozesskette erfasst und verarbeitet werden. Besonderer Fokus liegt im weiteren Verlauf der Dissertation auf dem Pre-Prozess zur bauteilindividuellen Additiven Fertigung, siehe Ab-

bildung 2-3. In diesem Kapitel sollen die Auswirkungen von Verwendung findenden Fertigungs- und Nachbearbeitungsverfahren auf den Pre-Prozess diskutiert werden. Ziel ist es, die verfahrensspezifischen Eigenschaften und Randbedingungen für die einzelnen Pre-Prozessschritte zu analysieren, um diese zur durchgängigen Identifikation bedarfsgerecht und prozessschrittspezifisch wieder bereitzustellen. Hierfür werden in diesem Kapitel erforderliche Informationsmengen gesammelt und analysiert. Diese Informationsmengen können im weiteren Verlauf dem Bauteil individuell zugeschrieben werden, so können beispielsweise Rückschlüsse von etwaig auftretenden Fehlern auf den Pre-Prozess vollzogen werden.

2.4.1 Auswirkungen auf die Bauteilprüfung

Der Pre-Prozess beginnt gemäß Kapitel 2.1 mit dem Eingang der Kundendaten und deren Prüfung. Diese Prüfung umfasst das Prüfen der Bauteilgeometrie auf deren fertigungsgerechte Auslegung. Additive Fertigungsverfahren ermöglichen bei der Bauteilauslegung deutlich mehr Freiheitsgrade gegenüber konventionellen Verfahren. Jedoch existieren auch hier geometrische Randbedingungen, die einzuhalten sind [258]. Daher müssen frühzeitig grundlegend einzuhaltende Restriktionen abgefragt werden, um Fehler während der Fertigung zu vermeiden. Im Folgenden werden Geometrieparameter beschrieben, welche es in eine vorgeschaltete Geometrieprüfung einzubeziehen gilt. Dabei wird sich auf die wichtigsten Geometrieparameter nach [194] beschränkt. Abschließend werden die Parameter mit einzuhaltenden Werten verfahrensspezifisch zusammengefasst.

Prüfung von Elementdicken

Bauteilschichten werden in der Ebene aus Konturbahnen und innenliegenden Rasterbahnen erzeugt. Jede dieser Bahnen erfordert ausreichend Raum zur Erzeugung. Dies bedeutet, dass die Elementdicke eines nicht gekrümmten Elements den erforderlichen Raum für die Materialbahnen zur Verfügung stellen muss, Abbildung 2-8. Bei unzureichendem Raum kann es zum Übertreten der Bahnen führen wodurch die Sollkontur überschritten wird und Maßabweichungen entstehen. [6; 7; 259]

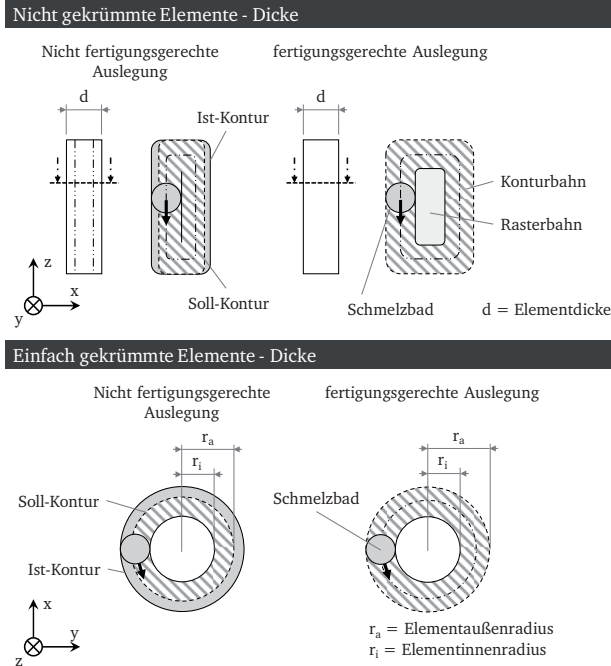


Abbildung 2-8: Prüfung von Elementdicken bei nicht gekrümmten und einfach gekrümmten Elementen nach [7]

Die Prüfung von Elementdicken prüft, dass die Dicke nicht gekrümmter Elemente so dick ist, dass jede Bauteilschicht aus Materialkontur und innenliegendem Materialraster aufgebaut werden kann. Bei einfach gekrümmten hohlen Elementen gilt es ebenfalls eine Mindestwanddicke zwischen Innen- und Außenradius zu beachten, siehe Abbildung 2-8 [7; 8].

Prüfung von Bauteilgröße

Die fertigbare maximale Bauteilgröße wird vom nutzbaren Bauraumvolumen definiert. Dies bedeutet, dass die zu fertigende Bauteilgröße den Bauraum nicht überschreiten darf. Die Bauraumgrößen sind maschinenspezifisch und müssen je nach verwendeter Fertigungsanlage individuell betrachtet werden, siehe Tabelle 2-2.

Prüfung von Elementdurchmessern

Analog zur Prüfung von Elementdicken müssen auch Mindestwerte bei der Verwendung von Zylindern und Bohrungen berücksichtigt werden. Zylinder und Bohrungen, die achsensymmetrisch zur z-Achse liegen, führen zu deutlich besseren Ergebnissen im Gegensatz zur achsensymmetrischen Auslegung in der x-y-Ebene, da bei letzterem der Treppenstufeneffekt negativ zu Tragen kommt [245]. Da die Festlegung der Bauteilorientierung erst später im Pre-Prozess erfolgt, werden hier die Elementdurchmesser auf den maximal notwendigen Mindestwert unabhängig von der Bohrungs- oder Zylinderorientierung geprüft. Bei einfach gekrümmten Elementen soll der Außenradius des zylindrischen Objektes so groß sein, dass jede Schicht samt Kontur- und Rasterbahnen aufgebaut werden kann, Abbildung 2-9. Dies gilt ebenso für den inversen Fall der Bohrungen. [7; 204]

Einfach gekrümmte Elemente – Durchmesser (Zylinder und Bohrungen)

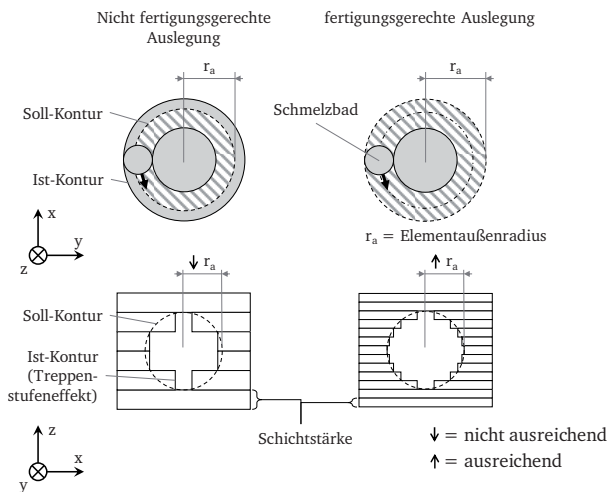


Abbildung 2-9: Prüfung von Durchmesser bei einfach gekrümmten Elementen nach [7; 204]

Für die vorliegende Betrachtung sollen die gezeigten Prüfungsverfahren für die Bauteilgeometrie genügen. Je nach Anwendungsfall ist die Bauteilprüfung beliebig erweiterbar, beispielsweise kann eine Prüfung auf Hohlräume stattfinden. Je nach Verfahren verbleiben die dispersen oder soliden Stützstrukturen in den Bauteilhohlräumen. Soll dem entgegengewirkt werden, müssen Volumendurchbrüche in die Bauteilgeometrie eingefügt werden. Daher sollte die Bauteilgeometrie auf

Hohlräume geprüft werden, um mit dem Auftraggeber die Notwendigkeit von Volumendurchbrüchen abzuklären. Weitere, je nach Anwendungsfall sinnvolle, Prüfparameter finden sich in [115; 245; 248].

Verfahrensspezifische Prüfung

Die vorgestellten Fertigungsverfahren nehmen wesentlichen Einfluss auf die durchzuführende Bauteilprüfung. Je nach Verfahren müssen die Parameter auf unterschiedliche Werte geprüft werden. Darüber hinaus hat nicht nur das Verfahren, sondern die verwendete Maschine enormen Einfluss auf die Prüfqualität. In Tabelle 2-2 werden zu prüfende Werte verfahrensspezifisch aufgeführt und zusammengefasst. Die gewählten Werte entsprechen Ergebnissen aus verschiedenen Untersuchungen nach [6; 7; 32; 115; 204; 212; 230; 245; 248; 259]. Sie sind verfahrens- und nicht maschinenspezifisch zu verstehen. Zur Prüfung der Bauteilgröße werden exemplarisch Maschinenparameter nach [2; 61; 226] verwendet.

Tabelle 2-2: Verfahrensspezifische Bauteilprüfung

Prüfungsart	Zu Prüfende Werte	
Prüfung von Elementdicken bei nicht gekrümmten Elementen	FDM:	$d \geq 1,5 \text{ mm}$ [6; 7; 259]
	SLS:	$d \geq 1,0 \text{ mm}$ [6; 7; 259]
	SLM:	$d \geq 0,6 \text{ mm}$ [6; 7; 32; 259]
Prüfung von Elementdicken bei einfach gekrümmten Elementen	FDM:	$r_a - r_i \geq 1,5 \text{ mm}$ [6; 7; 259]
	SLS:	$r_a - r_i \geq 1,0 \text{ mm}$ [6; 7; 259]
	SLM:	$r_a - r_i \geq 0,6 \text{ mm}$ [6; 7; 259]
Prüfung von Bauteilabmessungen	FDM:	$x \cdot y \cdot z \leq 203 \cdot 203 \cdot 305 \text{ mm}^3$ [226]
	SLS:	$x \cdot y \cdot z \leq 381 \cdot 330 \cdot 457 \text{ mm}^3$ [2]
	SLM:	$x \cdot y \cdot z \leq 250 \cdot 250 \cdot 280 \text{ mm}^3$ [61]
Prüfung von Zylinderdurchmessern	FDM:	$r_a \geq 2,0 \text{ mm}$ [204]
	SLS:	$r_a \geq 1,4 \text{ mm}$ [115; 212; 248]
	SLM:	$r_a \geq 0,3 \text{ mm}$ [7; 230]
Prüfung von Bohrungsdurchmessern	FDM:	$r_a \geq 2,0 \text{ mm}$ [204]
	SLS:	$r_a \geq 1,2 \text{ mm}$ [115; 212; 248]
	SLM:	$r_a \geq 0,7 \text{ mm}$ [230]

Legende: FDM = Fused Deposition ModellingTM (Strangablegeverfahren);
 SLS = Selektives LasersinternTM (Kunststoff-Laser-Sintern); SLM = Selective
 Laser MeltingTM (Laser-Strahlschmelzen); d = Elementdicke; r_a = Außenra-
 dius; r_i = Innenradius

2.4.2 Auswirkungen auf die Bauteilorientierung und -positionierung

Nachdem die Bauteilgeometrie geprüft und somit für die Additive Fertigung freigegeben ist, werden die Bauteile virtuell orientiert und positioniert, siehe Abbildung 2-3. In diesen Prozessschritten fallen erneut bauteilindividuelle Informationen an, welche verfahrensabhängig Rückschlüsse auf das Bauteilverhalten schließen lassen.

Bauteilorientierung

Die Bauteilqualität und Prozessgüte hängt im Wesentlichen von der gewählten Bauteilorientierung ab. Eine hier gewählte Ausrichtung des Bauteils kann den auftretenden Treppenstufeneffekt und das Aufrollen der Bauteilgeometrie (engl. Curling Effekt) minimieren. Des Weiteren wird die Oberflächenqualität, die Bauteilgenauigkeit sowie mechanische Bauteileigenschaften durch die gewählte Bauteilorientierung direkt beeinflusst. [65; 66; 258]

Für die Ermittlung der optimalen Bauteilorientierung existieren diverse Methoden und Algorithmen, wodurch verbesserte Bauteileigenschaften erzielt werden können [12; 187]. Diese Anwendungen arbeiten nach differenten Grundprinzipien, beispielsweise genetische Algorithmen [65]. Die hier vorliegenden Optimierungen erfolgen nach verschiedenen Optimierungsgrößen. Bei einer Mehrzieloptimierung werden mehrere Zielgrößen, also Optimierer, verwendet. Optimierungsziele sind in der Additiven Fertigung, je nach Verfahren, das Erreichen einer minimalen Bau-raumhöhe, minimale Fertigungsdauer, maximale Bauteilfestigkeiten oder eine hohe Oberflächenqualität [65; 127; 172; 173]. Für eine durchgängige Identifikation und letztlich Nachverfolgung der Bauteile müssen diese Parametersätze und Optimierungsgrößen bauteilindividuell erfasst und verarbeitet werden. Weitere anfallende wichtige Informationen sind die Ausgangsorientierung sowie die optimierte Orientierung der Bauteile [172]. Abbildung 2-10 zeigt beispielhaft die möglichen Drehungen von Bauteilen im dreidimensionalen Raum. Je nach Anwendungsfall werden die Bauteile über eine, zwei oder alle drei Koordinatenachsen gedreht und somit für die Additive Fertigung orientiert.

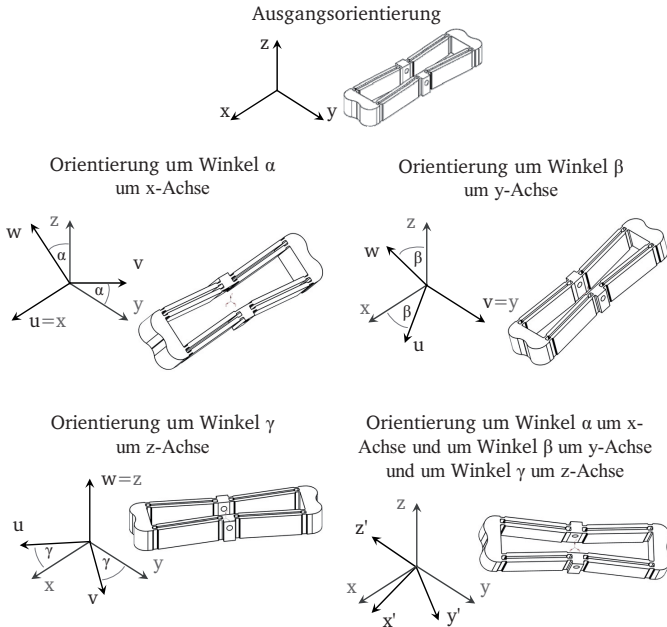


Abbildung 2-10: Ausgangs- und optimierte Orientierung eines Festkörpergelenks

Von besonderem Interesse sind die gewählten Drehwinkel sowie die Rotationsachsen der Koordinatentransformation. Diese lassen sich über Rotationsmatrizen mathematisch beschreiben und dem Bauteil individuell zuschreiben. Hierdurch können Rückschlüsse vom auftretenden Bauteilverhalten auf die gewählte Bauteilorientierung gezogen werden. Mathematisch werden die Rotationsmatrizen R wie folgt beschrieben [114; 180].

Rotation um den Winkel α um die x-Achse:

$$R_{(x,\alpha)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

Rotation um den Winkel β um die y-Achse:

$$R_{(y,\beta)} = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix}$$

Rotation um den Winkel γ um die z-Achse:

$$R_{(z,\gamma)} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Wird ein Bauteil über mehrere Achsen rotiert, werden die gezeigten Rotationsmatrizen, wie folgt, multipliziert. Die Reihenfolge der Multiplikation wird nach den gewählten Drehoperationen über die Koordinatenachsen gewählt, die nachstehende Formel beschreibt dies beispielhaft für die Reihenfolge x, y und z [114; 180].

$$R_{x,y,z} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Bauteilpositionierung

In der Prozesskette zur bauteilindividuellen Additiven Fertigung werden die Bauteile simultan gefertigt. Sollte ein Bauteil den gesamten Bauraum ausfüllen, findet eine sequentielle Fertigung statt. Nachdem ein Bauteil orientiert ist, wird dieses gemeinsam mit anderen orientierten Bauteilen in dem virtuellen Bauraum positioniert. Ziel der Bauteilpositionierung ist es, eine möglichst hohe Packdichte im Bauraum zu erreichen [56; 102]. Analog zur Optimierung der Bauteilorientierung existieren zur Optimierung der Bauraumpackung ebenfalls Ansätze zur Lösung solcher Zuschnitts- und Packprobleme, siehe [40; 65; 205; 228]. Das Positionieren der Bauteile lässt sich verfahrensabhängig in zwei- und dreidimensionale Probleme gliedern.

Bei zweidimensionalen Problemen werden Anwendungsfälle betrachtet, welche in einem ebenen Bereich optimieren. In der Additiven Fertigung finden diese Probleme bei Fertigungsverfahren Anwendung, bei denen Stützstrukturen verwendet werden. Hierzu zählen insbesondere das Strangablegeverfahren und das Laser-Strahlschmelzen [204; 213; 245]. Bauteile werden in der Regel nicht übereinander positioniert, womit sich die Optimierung auf das Verschachteln (engl. Nesting) von den Bauteilkonturen in der Bauebene beschränkt [57; 205]. Die zuvor orientierten Bauteile werden mit ihrer Maximalkontur auf die Bauplattform projiziert und somit zweidimensional angeordnet. Ähnlich wie bei der Bauteilorientierung sind hier auch die Lage der einzelnen Bauteile im Bauraum von Interesse, diese werden durch zweidimensionale Verschiebungsvektoren gegenüber dem Bauraumkoordinatensystem ausgedrückt. Der Vektor gibt die Verschiebung vom Koordinatenursprung zum Bauteilmittelpunkt oder Bauteilkoordinatensystemursprung an.

Dreidimensionale Packprobleme liegen vor, wenn ein dreidimensionaler Raum mit Bauteilen zu füllen ist (engl. Packing) [172; 205]. Beim Kunststoff-Laser-Sintern hat die Optimierung zum Ziel, die Bauteile möglichst dicht zu positionieren. Abbildung 2-11 zeigt ein solches Packproblem für das Kunststoff-Laser-Sintern. Identisch mit dem Vorgehen bei zweidimensionalen Problemen müssen hier verfahrens-spezifische Werte eingehalten und zur Nachverfolgung verarbeitet werden. Zu diesen zählen die Bauteilposition im dreidimensionalen Raum, Bauteilabstände zueinander sowie Bauteilabstände zum Bauraumrand. Komplettiert werden die Informationen durch die eingestellten Parameter für die Optimierung des Packproblems. Die Informationen zur Bauteilposition im dreidimensionalen Raum werden analog zum zweidimensionalen Packproblem hier mittels eines dreidimensionalen Vektors beschrieben, siehe Abbildung 2-11.

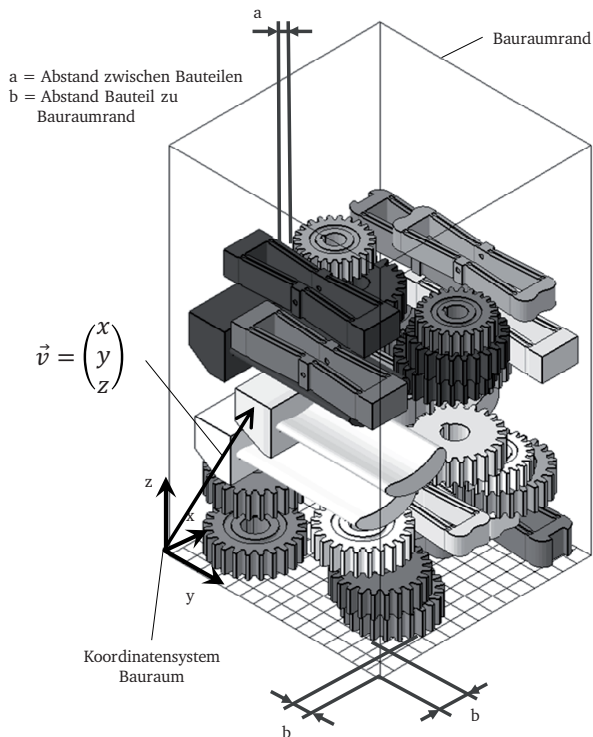


Abbildung 2-11: Dreidimensionales Packproblem beim Kunststoff-Laser-Sintern

2.4.3 Auswirkungen auf die Stützstruktur- und Schichtdatengenerierung

Abschließend sollen in diesem Unterkapitel die durch die Verfahren hervorgerufenen Auswirkungen auf die Schichtdatengenerierung im Pre-Prozess erörtert werden. Dies beinhaltet auch die Betrachtung von etwaig notwendigen Stützstrukturen. Darüber hinaus wird kurz auf die Verwendung des STL-Formats im Pre-Prozess eingegangen und welche Relevanz diese Verwendung im Kontext der vorliegenden Dissertation besitzt.

Stützstrukturen

Stützstrukturen werden in der Additiven Fertigung von der Mehrheit der Verfahren verwendet. Ausnahme bilden Verfahren, bei denen das Pulverbett während des Bauprozesses die stützende Funktion erfüllt. Diese Art der Stützstruktur wird als dispers bezeichnet und findet hier Anwendung beim Kunststoff-Laser-Sintern [7]. Demgegenüber stehen solide Stützstrukturen, welche beim Laser-Strahlschmelzen und Strangablegeverfahren Anwendung finden. Stützstrukturen werden nach [234] aus folgenden Gründen eingesetzt:

Separation von Bauteil und Bauplattform

Bei der Verwendung von soliden Stützstrukturen wird ein Versatz von Bauteil zu Bauplattform in z-Richtung eingefügt. Hierdurch kann das Bauteil samt Stützstruktur leichter von der Bauplattform im Post-Prozess entfernt werden.

Fixierung von Bauteilbereichen

Der schichtweise Aufbau durch die Additive Fertigung kann zu instabilen Zuständen während des Bauprozesses führen. Daher werden einzelne Bereiche von Bauteilen erst im späteren Verlauf der Fertigung miteinander verbunden, beispielsweise durch Sintern oder Schmelzen, sogenannte Inseln. Für ein genaues Zusammentreffen der Bauteilbereiche müssen diese Bereiche zuvor mit Stützstrukturen fixiert werden. Folge ist auch die Reduzierung von thermischen Verzug und Bauteildeformationen.

Stützung von überhängenden Strukturen

Um die Festigkeit von überhängenden Strukturen, beispielsweise Auskragungen, zu gewährleisten, werden diese während des Bauprozesses durch Stützkonstruktionen stabilisiert. Dadurch wird ein Absacken der Bereiche vermieden.

Optimierung des Bauprozesses

Beim Laser-Strahlschmelzen werden die Stützstrukturen aus Metall zur Wärmeableitung verwendet. [234]

Abbildung 2-12 zeigt fünf Anwendungsbeispiele, aufbauend auf den oben aufgeführten Gründen, für die Verwendung von Stützstrukturen. Anwendung A zeigt die Separation des Bauteils von der Bauplattform. Anwendung B veranschaulicht interne Stützstrukturen in einer Bohrung sowie externe zur Separation von der Bauplattform. Anwendung C zeigt das Abstützen eines Überhangs. Anwendung D stellt das Stützen und Stabilisieren einer Insel dar. Die stabilisierende Wirkung als Hilfsgeometrie wird in Anwendung E veranschaulicht. [172]

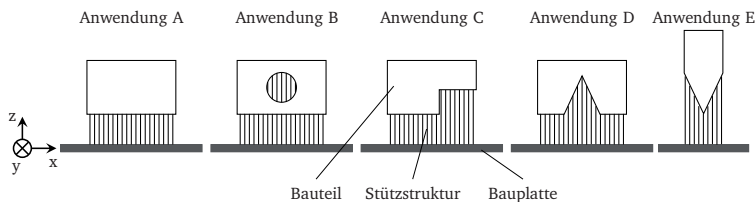


Abbildung 2-12: Anwendung von Stützstrukturen in Anlehnung an [172]

Je nach verwendetem Fertigungsverfahren und Anwendungsfall kommen verschiedene Ausprägungen der soliden Stützstrukturen zum Einsatz, beispielsweise Waben- oder Gitterstrukturen [172]. Für eine umfassende bauteilindividuelle Informationsbereitstellung müssen diese Informationen verarbeitet werden.

3D-Geometrietransformation

Die Ausprägung der Prozesskette zur Additiven Fertigung bestimmt auch, welche Austauschdatenformate verwendet werden. Da heutige Systeme im industriellen Umfeld primär basierend auf dem STL-Format Schichten generieren, sollen zu diesem Format Informationen bauteilindividuell verarbeitet werden können.

Trotz vielzähliger Nachteile des STL-Formats hat sich dieses in der industriellen Anwendung etabliert. Es beschreibt die Bauteiloberfläche als polyedrische Repräsentation aus Dreiecken [172]. Durch die Triangulierung wird die nativ beschriebene Geometriemodelloberfläche durch ein Netz aus Dreiecken approximiert. Die resultierende STL-Datei wird binär- oder ASCII-kodiert weiterverarbeitet. Die Beschreibung der STL-Datei wird durch die einzelnen Dreiecksfacetten mit den jeweiligen x-y-z-Koordinaten der jeweiligen Eckpunkte sowie dem Normalenvektor

der Facette beschrieben [142; 143; 172]. Neben der einfach handhabbaren Verarbeitung dieses Dateiformats liegen diverse Nachteile der Verwendung zu Grunde. Insbesondere die Genauigkeit der Approximation ist hier von Bedeutung. Durch die Approximation der Oberfläche treten Abweichungen gegenüber der Originalgeometrie auf. Diesem Effekt kann auf Kosten der Dateigröße mit feineren Netzgenauigkeiten entgegengewirkt werden. Ferner steigt durch die Verwendung von zusätzlichen und feineren Facetten die Fehlerwahrscheinlichkeit. Es können Lücken, Überlappungen oder Fehlorientierungen in der Beschreibung entstehen [110]. Zur ganzheitlichen Betrachtung des Bauteils ist es daher von Interesse, welche Approximationseinstellungen getroffen werden. Hierauf aufbauend können Rückschlüsse auf die Bauteilqualität oder das -verhalten durch die gewählte Netzgenauigkeit getroffen werden. Abbildung 2-13 zeigt relevante Approximationswerte und einen Auszug aus der ASCII-Kodierung zur Beschreibung einer STL-Datei.

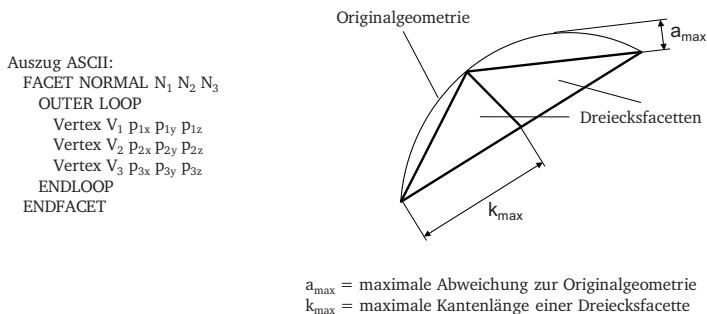


Abbildung 2-13: Beschreibung STL-Format (links) und festzulegende Approximationswerte (rechts)

An dieser Stelle sei erwähnt, dass eine Vielzahl an Alternativen für das STL-Format für den Datenaustausch in der Additiven Fertigung existieren. Diese beinhalten einen höheren Informationsgehalt gegenüber dem STL-Format, beispielsweise werden Farbinformationen oder die Oberflächen durch genauere Polygonzüge beschrieben. Zu den vielversprechendsten Alternativen zählen das *Additive Manufacturing File Format (AMF)*, das *3D Manufacturing Format (3MF)* oder das *Jupiter Tesselation Format (JT)*, siehe auch [3; 30; 134].

Schichtdatengenerierung

Der wichtige und für die Additive Fertigung typische Schritt im Pre-Prozess ist die Schichtdatengenerierung. Diese Generierung beschreibt den Prozess, bei dem die

zu fertigenden 3D-Geometriedaten durch ebene Schnitte parallel zur Bauplattform in Flächenbereiche und Bauteilkonturen schichtweise überführt werden [172]. Bei einer uniformen Schichtzerlegung werden die Schichten konstant über die Bauhöhe zerlegt. Demgegenüber steht die adaptive Schichtzerlegung, hier werden variable Schichtstärken verwendet. Basierend auf den geschnittenen STL-Daten werden die Schnittkonturen berechnet. Hierzu wird die Durchdringung zwischen den Kanten der Dreiecke und der jeweiligen Schichtebene bestimmt. In einem weiteren Schritt werden die Schichtdaten bereinigt [172]. Durch die Bestimmung aller Durchdringungspunkte sowie der Klassifizierung, gemäß der ursprünglich zugehörigen Dreiecksfacetten, liegen in einem ersten Ergebnis lediglich die Punkte in jener Schicht vor [172]. Die weitere Verwendung der Daten sieht vor, dass diese Punkte in Konturen überführt und überflüssige Punkte entfernt (bereinigt) werden müssen. Abschließend werden die Konturen jeder Schicht klassifiziert und als interne und externe Konturen deklariert. Hierdurch können die Füllbereiche identifiziert werden. [173; 206]

Neben der Schichtdatenerzeugung basierend auf dem STL-Format existiert, wie bereits erwähnt, die direkte Schichtzerlegung. Diese Erzeugung basiert direkt auf CAD-Geometriedaten. Die direkte Schichtzerlegung wird nach den gleichen beschriebenen Prinzipien durchgeführt, jedoch mit dem Verzicht einer Geometrieapproximation. Im industriellen Umfeld findet das direkte Schichtdatengenerieren derzeit noch keine Anwendung [214].

Aufbauend auf den erzeugten Schichtdaten werden die Belichtungs- bzw. die Extruderpfade berechnet. Zur Bestimmung der Konturpfade werden Polylinien oder Polygone verwendet [172]. Für die Füllbereiche werden verfahrensspezifische Belichtungs- bzw. Extruderpfade erzeugt. Diese Bewegung des Laserstrahls (beim Kunststoff-Lasersintern und Laser-Strahlschmelzen) oder des Extruders (beim Strangablegeverfahren) wird als Belichtungs- bzw. Füllstrategie bezeichnet. Die Strategie nimmt direkten Einfluss auf den Verfestigungsvorgang und die daraus resultierenden Bauteileigenschaften. Abbildung 2-14 veranschaulicht zum Einsatz kommende Strategien [140; 224; 257]. Typische Strategien sind die lineare Belichtung bzw. der linear verlaufende Materialauftrag in verschiedenen Winkeln. Es kann zwischen alternierenden Schichten und identisch aufbauenden Schichten differenziert werden. Erstere sind aufgrund der erzielbaren besseren Bauteileigenschaften vorzuziehen, siehe Abbildung 2-14 (alternierende Kreuz-Strategie). Die Wahl der Winkel für die Belichtung bzw. den Materialauftrag führt zu einer Parallel-Strategie oder zu einer Diagonal-Strategie, siehe Abbildung 2-14. Ein Sonderfall ist die Verwendung der Hexagonal-Strategie (Wabenstruktur). Diese findet

vermehrt Anwendung bei der Fertigung mittels des Strangablegeverfahren. [140; 224; 257]

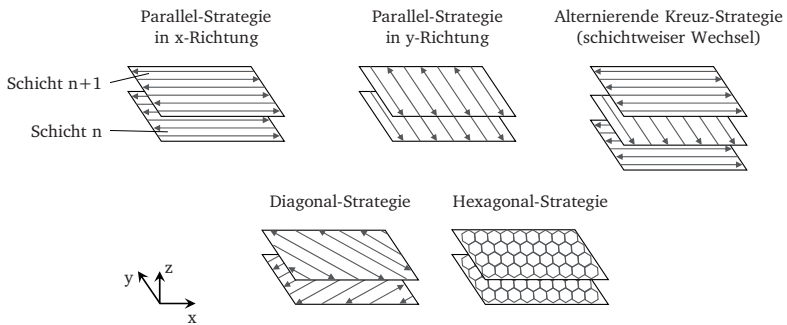


Abbildung 2-14: Beispielhafte Belichtungs- und Füllstrategien in der Schichtdatengenerierung

Neben den vorgestellten Belichtungs- und Füllstrategien beeinflussen ebenfalls verfahrensspezifische Parameter das resultierende Bauteilverhalten [141; 156].

2.5 Kennzeichnung und Identifikation von Bauteilen

Basis für eine durchgängige Nachverfolgung von additiv gefertigten Bauteilen über die gesamte Prozesskette oder den gesamten Produktlebenszyklus hinweg bildet die digitale sowie physikalische Markierung bzw. Kennzeichnung von Bauteilen mit Identifikatoren. Hierauf aufbauend können die Bauteile individuell identifiziert werden. In den folgenden Unterkapiteln werden in Frage kommende Identifikatoren und Kennzeichnungsmöglichkeiten vorgestellt.

2.5.1 Identifikatorarten

Identifikationssysteme verwenden zum Auslesen verschiedene Identifikatoren. Diese basieren im Wesentlichen auf physikalischen Grundprinzipien. Es wird zwischen optisch, mechanisch, elektronisch sowie magnetisch auslesbaren Identifikatoren differenziert [118; 243]. Darüber hinaus existieren Identifikationsmöglichkeiten, welche inhärente Eigenschaften von Objekten bzw. Bauteilen überprüfen. Abbildung 2-15 zeigt die Klassifizierung in Frage kommender Identifikatorarten.

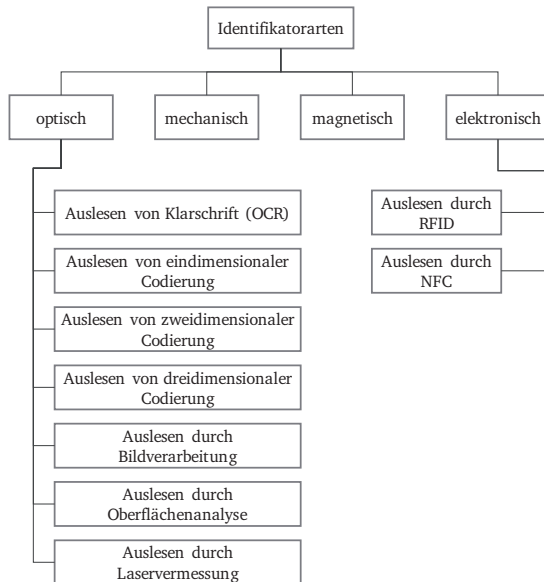


Abbildung 2-15: Identifikatorarten – Übersicht aufbauend auf [118; 243]

Für die vorliegende Dissertation sind insbesondere die optisch und elektronisch auslesbaren Identifikatoren von Relevanz. Diese werden in den nachstehenden Kapiteln näher erläutert. Der Vollständigkeit halber wird an dieser Stelle ergänzend auf magnetisch und mechanisch auslesbare Identifikatoren sowie auf die Modalanalyse von Bauteilen eingegangen.

Mechanische Identifikatoren benutzen topographische Oberflächenstrukturen, bei denen binärcodierte Informationen mithilfe von induktiven oder kapazitiven Sensoren ausgelesen werden [169]. Aufgrund der geringen Informationsdichte und der unveränderlichen Codierung bei relativ hohen Kosten werden diese Identifikatorarten in der Praxis kaum eingesetzt [118; 169]. Ferner existieren *magnetisch auslesbare Identifikatoren*, diese verwenden magnetisierbare Schichten als Informationsquelle, welche mittels induktiver Schreib- und Leseköpfen verändert und ausgelesen werden können [169]. Trotz der hohen Datenkapazität finden sie im industriellen Umfeld geringen Einsatz [164]. Grund hierfür ist die Empfindlichkeit gegenüber Magnetfeldern und der erforderliche sehr präzise Auslesevorgang [118]. Als weitere Möglichkeit hat sich die *Modalanalyse* in einigen Anwendungsfällen bewährt [123]. Der Einsatz einer Modalanalyse zielt auf das Erkennen von Material- und Sinterfehlern bei Bauteilen [189]. Darüber hinaus kann diese Art

der Analyse auch zur Identifizierung von Geometrien verwendet werden. Die Modalanalyse umfasst die Charakterisierung des dynamischen Verhaltens von Bauteilen mithilfe der Eigenfrequenz, der Eigenschwingungsform sowie der Masse und Dämpfung des untersuchten Systems [95; 179]. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist es, dass die Identifikationsmöglichkeit nicht zusätzlich angebracht werden muss. Demgegenüber stehen die Nachteile, dass sich die Ergebnisse nach Bauteilabnutzung verändern und das identische Bauteile hierdurch nicht voneinander differenziert werden können [189].

2.5.1.1 Optisch auslesbare Identifikatoren

Das optische Auslesen von Identifikatoren beruht auf dem Prinzip, dass mithilfe einer Lichtquelle die Oberfläche des Objektes bzw. des Bauteils beleuchtet wird. Durch eine Rechneinheit werden unter Zuhilfenahme von Fotosensoren die reflektierten Lichtmuster erkannt, ausgewertet und weiterverarbeitet [118; 169]. Abbildung 2-16 zeigt eine relevante Übersicht der optisch auslesbaren Identifikatoren, nachstehend werden diese erläutert.



Abbildung 2-16: Optisch auslesbare Identifikatoren – Relevante Übersicht

Bei der *optischen Zeichenerkennung* (engl.: Optical Character Recognition, kurz OCR) werden spezifisch definierte Zahlen und Buchstaben als Identifikator verwendet [118]. Die Ausprägung dieser optischen Klarschrift enthält nach Form, Größe und Abstand genormte Zeichen [164]. Durch eine Formalisierung ist die OCR-Schrift menschen- als auch maschinenlesbar [246]. Im Wesentlichen finden

zwei Arten von optischen Klarschriften Anwendung. Zum einen die OCR-A- und zum anderen die OCR-B-Schrift. Diese sind jeweils genormt und differenzieren sich nach Informationsdichte sowie Art der einsetzbaren Zeichen [118; 165]. Der Zeichenumfang der OCR-A-Schrift nach DIN 66008 umfasst in Summe 68 Zeichen. Diese inkludieren Standardzeichen, nationale und weitere Sonderzeichen sowie Währungszeichen [70]. Demgegenüber steht die OCR-B-Schrift nach DIN EN 14603, welche 122 Zeichen umfasst. Hier können zusätzlich Kleinbuchstaben abgebildet werden [83]. Das Auslesen beider Schriftarten erfolgt durch elektrophotische Abtaster, anschließend werden die Zeichenabbildungen in ASCII-Zeichen umgewandelt und weiterverarbeitet [118]. Besondere Vorteile bildet die Verwendung von OCR-Schrift in der Produktion, wenn neben der automatisierten Auslesung die Identifikatoren auch vom Menschen auslesbar sein müssen [129; 169].

Ebenfalls zu den eindimensionalen Identifikatoren gehört der *Strichcode* oder auch *Barcode* genannt. Diese Art von Identifikator wird ausgelesen, indem eine Lichtquelle den Code beleuchtet und das reflektierte Licht elektronisch ausgewertet wird [129]. Ein Strichcode besteht aus einem Feld von parallel angeordneten Strichen sowie zugehörigen Lücken [72]. Der Informationshalt wird durch die Variation und Kombination differenter Strich- und Lückenbreiten gebildet. Per Definition lassen sich diese Kombinationen als Zahlen, Buchstaben und Sonderzeichen interpretieren [243]. Die Vorschrift zur Bildung für die Kombinationsmöglichkeiten ist je nach Ausprägung des Strichcodes eindeutig beschrieben und in den meisten Fällen genormt [129; 188; 243]. Strichcodes lassen sich im Wesentlichen in Zweibreiten- und Mehrbreiten-Codes einteilen. Bei Zweibreiten-Codes ist der Abstand zwischen den Strichen jeweils konstant und die Striche selbst können nur durch zwei unterschiedliche Werte bzw. Breiten dargestellt werden. Demgegenüber steht der Mehrbreiten-Code, dieser nutzt variable Abstände und Strichbreiten [129; 188]. Es existieren eine Vielzahl an unterschiedlichen Strichcodes, zu den wichtigsten zählen der *EAN-Code* [50], der *Code UPC* [50], der *Code 128* bzw. *EAN 128* [49], der *Code 39* [10] sowie der *Code 2/5 Interleaved* [48]. Der in Abbildung 2-16 gezeigte EAN 128 Code ermöglicht das Darstellen von alphanumerischen Zeichen und besitzt eine variable Länge, außerdem kann diese Codeart den vollen ASCII-Zeichensatz darstellen [49]. Für detaillierte Angaben und Erläuterungen zu den verschiedenen Strichcodearten sei auf die zugehörigen Normen verwiesen.

Eine weitere Art des Strichcodes bildet der *POSTNET* (POSTal Numeric Encoding Technique) Code. Dieser wurde vom US-amerikanischen Post Office entwickelt

und dient zum schnelleren Auslesen und Verarbeiten der Postleitzahl des Adressaten. Der POSTNET Code wird durch zwei Strichlängen binär codiert. Fünf Striche bilden immer eine Einheit und somit jeweils ein Zahlzeichen. Die Abstände von Strichen und Lücken sind hier konstant. [164]

Zweidimensionale Identifikatoren werden für Datenmengen verwendet, welche mit eindimensionalen Identifikatoren nicht mehr dargestellt werden können. Durch das Benutzen von zwei Dimensionen können mehr Informationen auf einer nahezu identischen Fläche untergebracht werden [164]. Es wird zwischen Stapelcodes und Matrixcodes unterschieden. Analog zu den eindimensionalen Codes wird durch ein Lesegerät die Länge des Codes ausgelesen, hinzukommt das Auslesen der Breite des Codes. Hierdurch ist ein nahezu lageunabhängiges fehlerfreies Auslesen möglich [129].

Der Stapelcode verwendet die Grundstruktur des eindimensionalen Strichcodes. Er besteht jedoch aus mehreren übereinander angeordneten Strichcodes. Durch die Eigensicherheit der Codierung sowie mittels eines eingebrachten Prüfzeichens wird die Datensicherheit gewährleistet [164]. Eine häufig Anwendung findende Codeart ist der Stapelcode *Codablock F* [86]. Dieser basiert auf der Struktur des *EAN 128*. Es können in maximal 44 Zeilen jeweils bis zu 62 Zeichen codiert werden, dies ergibt einen Gesamtumfang von maximal 2728 Zeichen [86]. Weitere Stapelcodes bilden der Code *PDF 417* [87], dieser ermöglicht das Darstellen von maximal 1850 ASCII-Zeichen und 2710 Ziffern, und der *Code 16K* [84], dieser kann bis zu 77 ASCII-Zeichen und 154 Ziffern codieren. Für weiterführende Informationen sei auf die zugehörigen Normen verwiesen.

Matrixcodes verwenden zur Speicherung von Informationen quadratische, runde oder rechteckige Flächen, welche je nach Daten hell oder dunkel sind [243]. Die Bildungsvorschriften der hellen und dunklen Flächen werden in den meisten Fällen nach Normen spezifiziert. Die Matrixcodes besitzen jeweils eine Fehlerkorrektur, hierdurch können auch teils zerstörte oder nicht lesbare Codes ausgelesen werden [169]. Die Größe des jeweiligen Codes ist variabel und bestimmt die mögliche Informationsmenge. Zu den hier relevanten Matrixcodes zählen der *Data Matrixcode*, der *QR-Code* (Quick Response Code, dt.: schnelle Antwort) sowie der *Dotcode A*. Der *Data Matrixcode* besteht aus rechteckigen Flächen, wobei die Größe dieser Flächen variabel ist (von 10x10 bis 144x144 Feldern [129]). Das Suchmuster wird durch einen L-förmigen schwarzen Balken und einem dem gegenüberliegenden schwarz-weiß alternierenden Balken gebildet [169]. Dies bildet die Umrandung des Data Matrixcodes. Die Fehlerkorrektur erlaubt eine hohe Daten- und Auslesesicherheit [165]. Der Code kann bis zu einer Nichtlesbarkeit von 75% noch

ausgelesen werden [169]. Die maximalen darstellbaren Zeichen umfassen bis zu 2334 ASCII-Zeichen und 3116 Ziffern [132]. Eine weitere Art des Matrixcodes bildet der *QR-Code*. Diese Codeform ist quadratisch und wird durch geschachtelte helle und dunkle Quadrate in drei Ecken des Codes gekennzeichnet, welche auch als Suchelemente dienen [169]. Im Code befinden sich mindestens 21×21 und maximal 177×177 quadratische Elemente [129]. Dadurch lassen sich maximal 7089 Ziffern und 4296 ASCII-Zeichen darstellen [11]. Ähnlich wie der Data Matrixcode gibt der QR-Code eine hohe Daten- und Auslesesicherheit, so wird eine bis zu 30%ige Fehlerkorrektur gewährleistet [11; 165]. Die letzte hier relevante Art des Matrixcodes ist der *Dotcode A*. Diese Art der Codierung besteht aus einer quadratischen Anordnung von mindestens 6×6 bis maximal 12×12 Punkten (engl.: dots). Damit lassen sich maximal 42 Milliarden Objekte differenzieren [129]. Die Codierung besitzt fixe Suchpunkte bzw. -elemente und kann daher omnidirektional und mit größerem Abstand ausgelesen werden. Zum Auslesen wird weiterhin nur ein geringer Kontrast, im Gegensatz zu den oben gezeigten Codierungen, benötigt. [129; 164; 165]

Die nächste Ausbaustufe der optisch auslesbaren Identifikatoren sind dreidimensionale Codierungen. Diese bauen auf zweidimensionalen Codierungen auf und ergänzen diese durch farbliche Informationen [129]. Diese Art ist für die vorliegende Dissertation nicht von Relevanz.

Neben den beschriebenen Möglichkeiten existieren weitere optisch auslesbare Identifikatorarten, siehe Abbildung 2-15. Bei der *Bildverarbeitung* erfolgt die Datenerfassung mit Kamerasystemen, wobei die Objekte neben dem oben aufgezeigten optischen Auslesen von Codes ebenfalls nach Größe, Form oder Oberflächenstrukturen unterschieden werden [169]. Die Auswertung der Daten erfolgt nach der Methode der Mustererkennung. Mithilfe eines Suchalgorithmus wird ein fest definierter Bildteil ermittelt, welcher die erforderlichen Informationen erhält. Durch eine Merkmalinterpretation werden die analysierten Objekte klassifiziert und letztlich identifiziert [138; 169]. Neben der optischen Vermessung von Objekten durch die Bildverarbeitung ermöglicht die *Oberflächenanalyse* eine weitere Möglichkeit der Objektidentifizierung. Die durch die Fertigung und Nachbearbeitung des Objektes entstehenden Veränderungen der Oberfläche ist bei herkömmlichen Fertigungsverfahren von Objekt zu Objekt unterschiedlich. Diese Unterschiede werden durch Schleifen, Fräsen oder aufgrund von Verschleißerscheinungen verstärkt. Die dadurch entstehenden unterschiedlichen Oberflächenprofile können mit Kamerasystemen ausgelesen und identifiziert werden [67]. Eine wei-

tere Methode zur Identifizierung ist die *Laservermessung* oder die *manuelle Geometrievermessung* von Objekten. Hier werden die Objekte durch Abtasten von kurzen Laserimpulsen oder taktilen Messsensoren die außenliegenden Geometrien ermittelt. Diese können im Anschluss mit den virtuellen Geometriemodellen der Objekte abgeglichen und identifiziert werden [122]. Die Nachteile der genannten weiteren Möglichkeiten liegen zum einen in den hohen Aufwänden für die Identifikation und zum anderen in der nicht eindeutigen Identifizierbarkeit von Bauteilen. Insbesondere unterschiedliche Innenstrukturen von Objekten bei gleicher äußerer Geometrie können durch diese Verfahren nicht unterschieden werden.

2.5.1.2 Elektronisch auslesbare Identifikatoren

Die elektronische Datenerfassung und -verarbeitung bietet die Möglichkeit, Objekte bzw. Bauteile berührungslos zu identifizieren. Die *RFID-Technologie* (Radio Frequency Identification) ist hier die wichtigste Technologie, sie arbeitet basierend auf elektromagnetischen Wechselfeldern [100; 125]. Zum Austausch von Daten dient ein elektronischer Datenträger, der sogenannte Transponder oder Tag. Der Transponder besteht aus einem Datenspeicher, einem A/D-Wandler, einer Antenne sowie einem Microcontroller [147]. Der Datenspeicher ist je nach Art und Anwendungsfall wiederbeschreibbar oder nicht. Die Komponenten der RFID-Technologie lassen sich in unterschiedlichen Bauformen unterbringen. Limitierende Faktoren sind die Größe der Elektronik sowie die der Antenne. Die Antenne kann je nach Bauart als Drahtwicklung, gedruckte Spule oder als Dipol integriert sein [129]. Die Arten von RFID-Transpondern differenzieren sich im Wesentlichen in die Ausführung der Energieversorgung, der verbauten Speichertechnik und dem gewählten Frequenzbereich für die Datenübertragung [129; 133].

Die Stromversorgung der RFID-Transponder erfolgt aktiv, passiv, semiaktiv oder semipassiv. Die aktive Stromversorgung wird durch eine externe Batterie erreicht. Demgegenüber steht die passive Stromversorgung, hier wird die benötigte Energie zum Auslesen der Daten durch Induktion aus dem elektromagnetischen Feld des Lesegerätes gewonnen. Bei einer semiaktiven Versorgung wird der Transponder durch eine eingebaute Batterie versorgt, allerdings wird das Senden von Daten über eine passive Vorgehensweise durchgeführt. Bei semipassiven Transpondern wird die eingebaute Batterie nur zum Senden von Daten verwendet, dies führt zu einer erhöhten Reichweite. Aufgrund dessen, dass passive Transponder eine geringe Baugröße ermöglichen und eine nahezu unbegrenzte Lebensdauer, finden diese die größte Anwendung. [243]

Die Reichweiten beim Auslesen von RFID-Transpondern sind abhängig von den vorliegenden Anforderungen und werden durch verschiedene Frequenzen für die Kommunikation zwischen Transponder und Schreib- bzw. Lesegerät definiert [129]. Hierdurch lassen sich Low-Frequency (LF, 30kHz bis 300 kHz)-, High-Frequency (HF, 3MHz bis 30MHz)- und Ultra-High-Frequency (UHF, 850MHz bis zu 5,8GHz)-Transponder differenzieren [118; 129; 133]. Die Reichweiten beim Auslesen reichen je nach Transponderart und Frequenzbereich von wenigen Zentimetern bis zu 10 Metern bei passiven Systemen [129].

Die *Near-Field Communication* (NFC) funktioniert basierend auf der RFID-Technologie. Hierbei handelt es sich um eine Spezifikation der RFID-Technologie, welche mit einer Frequenz von 13,56 MHz arbeitet. Die große Verbreitung von NFC-Transpondern wird durch die Integration von Hard- und Software zum Auslesen in Mobiltelefonen begünstigt. [162]

Transponder können in unterschiedlichen Formen verbaut werden. Die fortschreitende Miniaturisierung von Elektronikkomponenten erlaubt RFID- oder NFC-Transponder in dünne Etiketten einzulaminieren [129; 243]. Ferner existieren schlagfeste und bis zu 200°C hitzebeständige RFID-Datenträger [118].

2.5.2 Möglichkeiten zur Bauteilkennzeichnung

Ein Identifikator benötigt zur An- oder Einbringung am Objekt einen Kennzeichnungsträger. In Frage kommende Kennzeichnungsträger im Kontext der Bauteilkennzeichnung in der Additiven Fertigung lassen sich klassifizieren, siehe Abbildung 2-17. Hier wird zwischen den drei räumlichen Ausprägungen volumenintegriert, oberflächenintegriert und (partiell-)körperumschließend differenziert.

Für die vorliegende Dissertation sind nicht alle in Abbildung 2-17 gezeigten Kennzeichnungsträger von Relevanz. Hierzu zählen insbesondere der Inkjetdruck, die Laserbeschriftung, die Prägung und die elektrochemische Ätzung als Umsetzungsmittel für einen oberflächenintegrierten Kennzeichnungsträger, aber auch die Aufklebung von Fremdkomponenten (siehe gestrichelte Kästen in Abbildung 2-17). Grund hierfür ist, dass diese nicht prozessintegriert ablaufen. Es sind für diese Umsetzungsmittel zusätzliche Prozessschritte notwendig. Dies genügt nicht der Anforderung, dass der Prozess der Identifikation in der bauteilindividuellen Additiven Fertigung schlank gehalten werden soll. Daher beschränken sich die nachfolgenden Erläuterungen auf die restlichen Umsetzungsmittel für einen Kennzeichnungsträger.

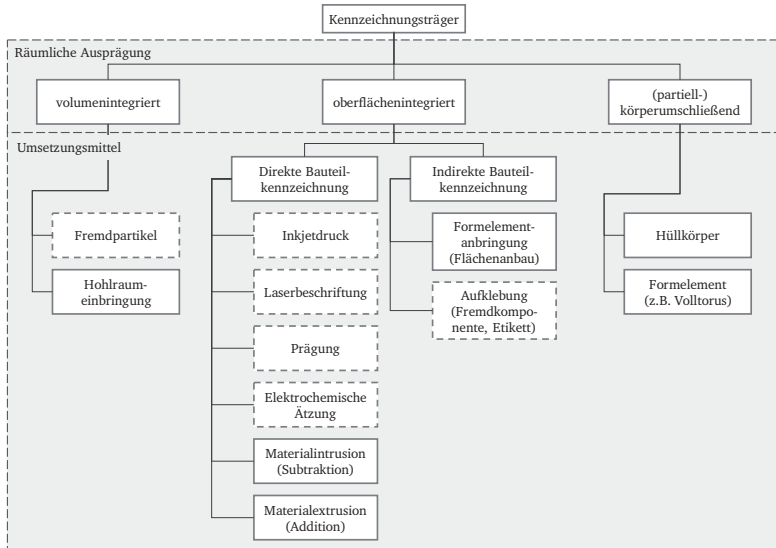


Abbildung 2-17: Klassifizierung Kennzeichnungsträger

2.5.2.1 Volumenintegrierte Kennzeichnungsträger

Volumenintegrierte Kennzeichnungsträger dienen zur prozessintegrierten Anbringung von Identifikatoren in das Bauteilinnere. Die verschiedenen Umsetzungsmittel werden simultan in das Bauteil integriert bzw. eingebaut, sodass ein zerstörungsfreies Entnehmen der Kennzeichnungsträger im späteren Verlauf nicht möglich ist. Es lassen sich im Wesentlichen zwei Möglichkeiten zur volumenintegrierten Einbringung von Kennzeichnungen unterscheiden.

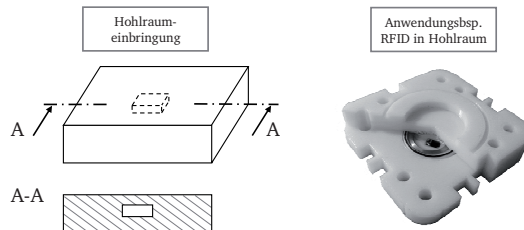


Abbildung 2-18: Betrachtete Umsetzungsmittel volumenintegrierter Kennzeichnungsträger (nach [16; 137])

Bei der Anwendung von Kunststoff-Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen stellt das Einbringen von *Fremdpartikeln* in das gesinterte Material eine Möglichkeit dar,

Identifikatoren einzubringen. Mithilfe von definiert im Pulver eingebrachten Fremdpartikeln, in Kugel- oder Plättchenform, wird eine kodierte Information, siehe auch Matrixcode erzeugt. Aufbauend auf diesen Fremdpartikeln als Kennzeichnungsträger kann eine kodierte Informationsmatrix identifiziert werden. Diese Matrix dient im Identifikationssystem dazu, eine dauerhafte Kennzeichnung im Bauteil zu verankern. Auf Grund dessen, dass die Fremdpartikel sich vom Bauteilmaterial differenzieren, kann die Informationsmatrix durch eine aufwendige Verwendung von Röntgenstrahlen oder Ultraschalltechnik ausgelesen werden. Vorteilhaft ist insbesondere, dass die derart eingebrachten Informationen nachträglich nicht verändert und somit nicht manipuliert werden können. Ferner wird die Oberflächenqualität nicht negativ beeinträchtigt. Je nach Anwendungsfall und Anforderungsprofil an das zu fertigende Bauteil, ist das Einbringen von Fremdpartikeln jedoch nicht erwünscht und umsetzbar. Weiterhin ist im Stand der Technik bzw. in der aktuellen Anlagentechnik diese Art der Kennzeichnung nicht prozesssicher implementiert [39; 131; 258]. Daher wird diese im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Neben dem Einbringen von Fremdpartikeln lassen sich gezielt *Hohlräume* in Bauteilvolumina integrieren, siehe Abbildung 2-18 links. Hierdurch wird ermöglicht, dass optisch auslesbare Identifikatorarten unterhalb der Bauteiloberfläche platziert werden können. Das optische Auslesen dieses Umsetzungsmittel ist stark vom Material und Abstand zur Oberfläche abhängig [137]. Neben dem Einbringen von optisch auslesbaren Identifikatoren erlaubt der schichtweise Aufbau in der Additiven Fertigung das Einbringen bzw. Einlegen von Fremdkomponenten in die Kennzeichnungsträger in Form von *Hohlräumen*. Beispielsweise können hierdurch RFID- oder NFC-Transponder in Bauteile integriert werden, siehe das Anwendungsbeispiel in Abbildung 2-18 rechts. Limitierender Faktor für diesen Anwendungsfall sind hohe Temperaturbereiche, durch die die elektronischen Komponenten beschädigt werden können. Analog zur Einbringung von Fremdpartikeln sind Fremdkomponenten für eine über den gesamten Lebenszyklus hinweg fortlaufende Identifikation geeignet [16; 147]. Die prozessintegrierte volumenintegrierte Kennzeichnung nimmt keinen Einfluss auf die Oberflächenqualität jedoch aufgrund von entstehenden Kerbwirkungen auf bauteilinterne Kraftverläufe. Durch letztere kann der Kraftschluss beeinflusst werden und es zu einem Bauteilversagen kommen.

2.5.2.2 Oberflächenintegrierte Kennzeichnungsträger

Wie in Abbildung 2-17 zu sehen ist, werden oberflächenintegrierte kennzeichnungsträger in direkte und indirekte Kennzeichnungsarten unterschieden [111;

252]. Abbildung 2-19 zeigt die relevanten Umsetzungsmittel, hierzu zählen die Materialintrusion und die Materialeextrusion (direkte Verfahren) sowie die Formelementanbringung (indirektes Verfahren).

Die *Materialeextrusion* und *Materialintrusion* werden durch die Ausprägung der Additiven Fertigung begünstigt. Hierbei handelt es sich um geometrische Elemente, welche im 3D-Geometriemodell mittels booleschen Operatoren entweder vom Grundkörper subtrahiert oder mit diesem addiert bzw. vereinigt werden. Die Kennzeichnungsträger werden simultan mit dem eigentlichen Bauteil gefertigt und sind dauerhaft mit diesem verbunden, was ein lebenslanges Auslesen eines eingebrachten Identifikators ermöglicht. Aufgrund dessen, dass die Materialeextrusion das Bauteil auf der Oberfläche, ergänzt findet keine direkte Beeinflussung von Spannungsverläufen statt. Jedoch werden vorliegende Kontaktflächen je nach Anwendung durch die aufgebraute Erhebung gestört. Demgegenüber steht die Materialintrusion, hier bleiben alle Kontaktflächen am Bauteil erhalten, allerdings können durch eingebrachte Kerben in der Bauteiloberfläche negative Auswirkungen für die Spannungsverläufe entstehen. Beide Ausprägungen unterliegen dem Vorteil, dass sie prozessintegriert gefertigt und dauerhaft auslesbar sind. [137]

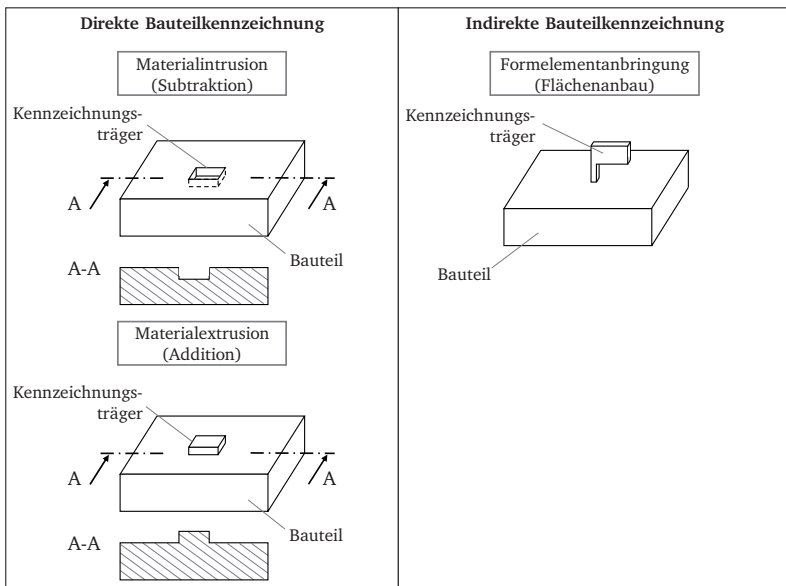


Abbildung 2-19: Betrachtete Umsetzungsmittel oberflächenintegrierter Kennzeichnungsträger (in Anlehnung an [137])

Die *Materialextrusion* und *Materialintrusion* werden durch die Ausprägung der Additiven Fertigung begünstigt. Hierbei handelt es sich um geometrische Elemente, welche im 3D-Geometriemodell mittels booleschen Operatoren entweder vom Grundkörper subtrahiert oder mit diesem addiert bzw. vereinigt werden. Die Kennzeichnungsträger werden simultan mit dem eigentlichen Bauteil gefertigt und sind dauerhaft mit diesem verbunden, was ein lebenslanges Auslesen eines eingebrachten Identifikators ermöglicht. Aufgrund dessen, dass die Materialextrusion das Bauteil auf der Oberfläche, ergänzt findet keine direkte Beeinflussung von Spannungsverläufen statt. Jedoch werden vorliegende Kontaktflächen je nach Anwendung durch die aufgebraute Erhebung gestört. Demgegenüber steht die Materialintrusion, hier bleiben alle Kontaktflächen am Bauteil erhalten, allerdings können durch eingebrachte Kerben in der Bauteiloberfläche negative Auswirkungen für die Spannungsverläufe entstehen. Beide Ausprägungen unterliegen dem Vorteil, dass sie prozessintegriert gefertigt und dauerhaft auslesbar sind. [137]

Neben den direkten Bauteilkennzeichnungen bieten indirekte Bauteilkennzeichnungen ebenfalls eine Möglichkeit zur Kennzeichnung, siehe Abbildung 2-17. Der *Anbau von Formelementen*, beispielsweise in Form von Fähnchen als Kennzeichnungsträger, wird simultan mit dem Bauteil gefertigt. Die derart erzeugten Träger sind nicht für ein dauerhaftes Auslesen geeignet, da sie spätestens vor Verlassen des Post-Prozesses mechanisch entfernt werden [22; 174].

2.5.2.3 (Partiell-)körperumschließende Kennzeichnungsträger

Bauteile lassen sich in der Additiven Fertigung kennzeichnen, ohne dass der Kennzeichnungsträger direkt mit dem Bauteil verbunden ist. Die Kennzeichnungsträger umschließen das Bauteil je nach Art partiell oder komplett. Hierzu kommen Hüllkörper oder partiell umschließende Formelemente in Frage, siehe Abbildung 2-20.

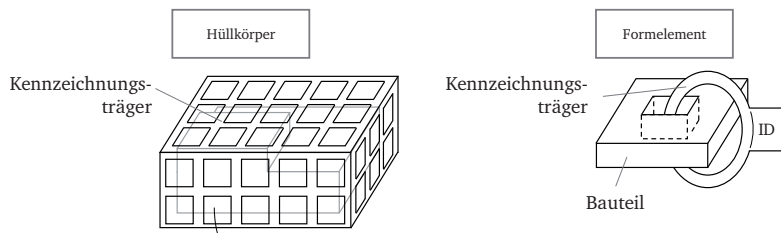


Abbildung 2-20: Betrachtete Umsetzungsmittel (partiell-)körperumschließender Kennzeichnungsträger

Der Einsatz von *Hüllkörpern* eignet sich insbesondere für den Zusammenschluss von kleinen Bauteilen oder zur expliziten Abgrenzung von Bauteilen im Bauraum. Hierfür müssen am Bauteil selbst keine Änderungen vorgenommen werden. Die betroffenen Bauteile werden durch einen Käfig umschlossen, welcher prozessintegriert gefertigt wird. Der so entstehende Käfig kann im Wesentlichen in zwei Ausprägungen vorliegen, zum einen als minimal umgebendes Rechteck und zum anderen als bauraumoptimierter Freiformhüllkörper, siehe Abbildung 2-20. Das minimal umgebende Rechteck beschreibt das kleinstmögliche achsenparallele Rechteck, was die ausgewählten Bauteile umschließt. Auf der Oberfläche des gewählten Hüllkörpers werden die unterschiedlichen Identifikatoren aufgebracht, beispielsweise durch Materialextrusion. Zur Nachbearbeitung müssen die Hüllkörper in der Regel entfernt werden, womit eine durchgängige Kennzeichnung nur bedingt möglich ist. Außerdem ist für die Fertigung des Käfigs ein höherer Materialaufwand erforderlich. [33; 174]

Als partiell umschließende Kennzeichnungsträger kommen zusätzlich angebrachte *Formelemente* zum Einsatz. Diese Art der Kennzeichnung erfordert im Bauteil das Vorhandensein eines Volumendurchbruches, hierdurch kann ein Formelement, beispielsweise ein Volltorus, berührungslos am Bauteil angebracht werden. Es wird somit ein sogenannte Interlock (dt.: berührungslose Verriegelung oder berührungslose Schlossverbindung) erzeugt, siehe Abbildung 2-20. Analog zur Verwendung von Hüllkörpern dient diese Art der Kennzeichnungsträger nicht für eine dauerhafte Identifikation. Je nach geometrischer Auslegung des Trägers sind verschiedene Nachbearbeitungsverfahren durchführbar. Nach Beendigung des Post-Prozesses wird der Kennzeichnungsträger mechanisch entfernt. Die prozessintegrierte Anbringung zieht einen erhöhten Materialaufwand nach sich, bietet aber die Möglichkeit, Identifikatoren direkt am angebrachten Formelement anzubringen. [174]

2.6 Relevante Forschungsansätze und industrielle Umsetzungen

Aus dem untersuchten wissenschaftlichen Schrifttum und den analysierten industriellen Anwendungen geht hervor, dass die bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Identifikation für die Additive Fertigung nicht erforscht oder umgesetzt worden ist. Allerdings bestehen interessante Ansätze und erste Implementierungen, welche einzelne Schritte der Prozesskette und Teilaspekte der Gesamtlösung der vorliegenden Dissertation thematisieren und somit eine Relevanz für diese Dissertation mit sich bringen. Im Folgenden werden diese Ansätze und Lösungen kurz vorgestellt, da diese als bereits existierende Ansätze in das Konzept und die

spätere Implementierung mit aufgenommen werden sollen. Für weiterführende Informationen ist an dieser Stelle auf die jeweilig angegebene Literatur verwiesen. Einen guten Überblick über wissenschaftliche Ansätze und entwickelte Softwareanwendungen zur Unterstützung des Pre-Prozesses gibt MARTHA in [172].

Der Pre-Prozess zur kundenindividuellen Additiven Fertigung beginnt mit der Bauteilprüfung. Hier werden insbesondere die STL-Dateien auf Fehler und deren Weiterverarbeitbarkeit geprüft und, falls erforderlich, repariert. LEONG *et. al* liefert in [166; 167] einen Überblick zur auftretenden Fehlern und Reparaturalgorithmen. Zu den Fehlern gehören Löcher, Lücken, falsch orientierte Flächennormalen oder auch Überlappungen [168]. Durch Algorithmen werden die Fehler lokalisiert und die Bauteilgeometrien repariert, dies führt zu konsistenten STL-Dateien, welche weiterverarbeitet werden können. Diese Lösungsansätze sind bereits in kommerziellen Softwareanwendungen fester Bestandteil, beispielsweise in *Materialise Magics* und *Autodesk Netfabb* [33; 174]. Hier werden neben den integrierten Reparaturalgorithmen ebenfalls Prüfungen zu Position, Größe, Volumen, Ausrichtung von Flächen, Schwerpunkt oder Wandstärken durchgeführt. Dies ermöglicht auch das Prüfen auf Machbarkeit hinsichtlich der Fertigung. ARNDT *et. al* stellt in [23] Handlungsempfehlungen zur Prüfung von additiv zu fertigender Bauteile vor. Darauf aufbauend wird in [24] ein Werkzeug zur Prüfung eben dieser Bauteile entwickelt. Dieses bietet die Möglichkeit bereits im Konstruktionsprozess die technische Machbarkeit der Bauteilgeometrie zu überprüfen.

Für die Optimierung der Bauteilorientierung und -positionierung existieren eine Vielzahl an wissenschaftlichen Untersuchungen. So beschreiben ALLEN und DUTTA in [14] grundlegende Untersuchungen zur STL-basierten Optimierung der Bauteilorientierung. CHENG *et. al* liefert in [58] einen Ansatz, welcher insbesondere die Lageoptimierung von Bauteilen hinsichtlich einer optimalen Bauzeit optimiert. Einen umfassenden Ansatz zur Bauteilorientierung liefert DANJOU in [65]. Hier werden eine Vielzahl an Einflussfaktoren berücksichtigt, so werden im entwickelten Orientierungsalgorithmus Einflüsse und Zusammenhänge der Orientierung auf die Stützstruktur, die Bauteilqualität und die Wirtschaftlichkeit betrachtet. Aufbauend hierauf wurden in ARNDT *et. al* der Schwerpunkt auf prozessspezifische Einflussfaktoren sowie auf das mechanische Verhalten der Bauteile gelegt [25]. SINGHAL *et. al* führt in [216] eine Optimierung der Bauteilorientierung durch, welche als primäres Ziel eine optimierte Oberflächenrauheit der Bauteile hervorruft. Neben den wissenschaftlichen Ansätzen für ein optimiertes Orientieren und Positionieren von Bauteilen bestehen eine Reihe von bereits im Ein-

satz befindlicher kommerzieller Software. Hierbei werden üblicherweise, aufgrund der weiten Verbreitung, STL-Dateien der Geometrie verwendet. Zu den Wesentlichen in Verwendung befindlichen Softwarelösungen zählen *Materialise Magics Sintermodule* [174] und *Autodesk Netfabb Packing* [33]. Die Anwendungen erlauben das benutzerdefinierte Orientieren und Positionieren von 3D-Objekten, basierend auf hinterlegten Optimierungsalgorithmen [33; 174]. Primäre Zielgrößen zur optimalen Orientierung und Positionierung von Bauteilen sind in den beiden Softwarelösungen die Minimierung der Stützstruktur sowie die minimale Bau- raum- und Bauteilhöhe. CAD-Programme erhalten nach und nach ebenfalls die Funktionalitäten für den Pre-Prozess, so beispielsweise auch *SIEMENS NX*, *Dassult Systems SolidWorks* oder *Autodesk Inventor* [155; 258], wobei die gängigen CAD-Softwareanbieter auf *Materialise Magics* und *Autodesk Netfabb* aufbauen und deren Algorithmen verwenden. Ferner existieren spezielle Nischenanwendungen für verschiedene Branchen oder kostenlose Anwendungen für den Heimanwenderbereich, siehe beispielsweise die Softwarelösungen *Fraunhofer PackAssistant* [103], *Alma PowerNest* [15] oder *NestFab* [93].

Für das Erzeugen von Stützstrukturen für die Additive Fertigung existieren verschiedene wissenschaftliche und kommerzielle Ansätze. ALLEN und DUTTA beispielsweise entgegnen dem Problem Stützstrukturen facettenbasiert zu erzeugen in [13]. Hierdurch können, basierend auf STL-Dateien, Stützstrukturen an zu fertigenden Objekten angebracht werden. YANG *et. al* ermittelt die optimalen Stützstrukturen ähnlich wie ALLEN und DUTTA in drei Schritten. Zuerst werden zu stützende Flächen anhand deren Normalenvektoren identifiziert. Anschließend werden die Kontaktflächen bestimmt und im letzten Schritt wird algorithmenbasiert die Geometrie der Stützstrukturen generiert [13; 255]. Für die Minimierung der Kontaktflächen und somit auch für die Minimierung der erforderlichen Stützstrukturen liefert MAJHI *et. al* wissenschaftliche Lösungen [170; 225]. Hier wird mithilfe von Stützpolygonen eine Funktion hergeleitet, welche die benötigten Stützkonstruktionen berechnet. Darüber hinaus gehen STRANO *et. al* und DUMAS *et. al* der Frage nach, inwiefern die Geometrie der Stützkonstruktionen optimiert werden kann. Durch mathematische Funktionen können komplexe Strukturen, beispielsweise zelluläre Strukturen, schnell erzeugt werden und die Ergebnisse werden in einer STL-Datei zur Weiterverarbeitung gespeichert [92; 225]. Analog zur rechnergestützten Bauteilorientierung und -positionierung stehen auch bei der Generierung von Stützstrukturen Softwarelösungen zur Verfügung. Auch hier bieten *Materialise Magics* und *Autodesk Netfabb* umfassende Funktionen

zur Erzeugung von Stützstrukturen, welche die Kernfunktionalitäten der gezeigten wissenschaftlichen Ansätze bereitstellen. Es existieren Algorithmen, welche das Generieren von differenten Stützstrukturtypen erlauben. Hierzu zählen u. a. balkenförmige, löchrige, wabenförmige oder massive Stützstrukturen [33; 174]. Ferner finden die Softwaresysteme *Simplify3D Support* [215], *Adobe Photoshop CC* [9] und *3D Printing Systems Kevvox K-Studio* [1] vermehrt Anwendung bei der rechnergestützten Stützstrukturierung.

Der letzte Schritt im Pre-Prozess umfasst das Generieren der Schichtdateninformationen. Wie bereits beschrieben kann dieses Generieren der Schichtinformationen auch direkt auf der additiven Fertigungsanlage geschehen, das Vorgehen ist jedoch identisch. Im industriellen Einsatz verfügen die bereits genannten Softwarelösungen alle über die notwendigen Algorithmen und Logiken zur Erzeugung der verfahrens- und maschinenspezifischen Schichtdatengenerierung, siehe [1; 9; 33; 174; 215]. Je nach Art der gewünschten Schichtdaten, ob durch uniforme Zerlegung [158], adaptive inkrementelle [63; 171] oder adaptive Top-Down-Schichtzerlegung [203], basieren diese Programme auf wissenschaftlichen Ansätzen.

Neben den analysierten Pre-Prozessschritten, welche dem Stand der Technik entsprechen, wird für eine bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Identifikation für die Additive Fertigung eine durchgängige virtuelle sowie physische Nachverfolgung sowie Bauteilkennzeichnung benötigt. Es existieren nach Sichtung und Analyse des wissenschaftlichen Schrifttums und der am Markt verfügbaren Softwarelösungen keine Ansätze, welche Objekte bzw. Bauteile teil- oder vollautomatisiert mit einer fortlaufenden Kennzeichnung von Identifikatoren versehen. Es sind lediglich Lösungen zur Kennzeichnung von identischen Bauteilen verfügbar. So schlägt JAHNKE in [137] einen Ansatz vor, in dem der Mitarbeiter im Pre-Prozess ein Kennzeichnungsmuster erzeugt, in diesem sind Kennzeichnungstyp, Position und Orientierung hinterlegt. Die darauf aufbauend erzeugte STL-Datei wird dann im Pre-Prozess, nachdem alle identischen Bauteile orientiert und positioniert sind, mit dem Bauteil mittels boolescher Operation vereint. Neben der Anwendungseinschränkung auf identische Bauteile, erfordert der Ansatz eine manuell angebrachte Kennzeichnungsstelle durch den Bediener. Diese Vorgehensweise spiegelt sich im Leistungsspektrum kommerzieller Software wider [33; 174]. Werkzeuge zum Anbringen von Kennzeichnungen bzw. Markierungen funktionieren nur durch manuelles Hinzufügen von Bauteilbereichen und basieren keineswegs auf methoden- und verfahrensbedingtem Wissen.

2.7 Fazit und Potentiale

In diesem Kapitel wurde das Umfeld der bauteilindividuellen Additiven Fertigung mit dem Schwerpunkt auf dem Pre-Prozess untersucht. Dabei wurde herausgearbeitet, welche Einflussfaktoren und Restriktionen auf die bauteilindividuelle Additive Fertigung durch die Fertigungs- und Nachbearbeitungsverfahren hervorgerufen werden. Durch die Analyse der Literatur sowie vorhandener Normen und Richtlinien konnten quantitativ beschreibbare Auswirkungen der zum Einsatz kommenden Verfahren auf die einzelnen Pre-Prozessschritte beschrieben werden. Diese Auswirkungen rufen für die erfolgreiche Bearbeitung der Prozessschritte Regeln und Richtlinien hervor, welche es zu beachten gilt. Diese Beachtung und Verwendung findet in keiner strukturierten und methodisch-gestützten Form statt. Der jeweilige Mitarbeiter bestimmt spezifisch, basierend auf seinem Methoden- und Fachwissen, die Bearbeitung des Prozesses.

Um eine durchgängige Identifikation und Nachverfolgung von kundenindividuellen additiv gefertigten Bauteilen zu erreichen, wurden in diesem Kapitel Kennzeichnungs- und Identifikationsmöglichkeiten untersucht. Dabei wurden insbesondere Arten von Kennzeichnungsträgern, welche für die Additive Fertigung in Frage kommen, analysiert und beschrieben. Ferner ist aus einer Vielzahl an Identifikatorarten eine relevante Auswahl für den vorliegenden Anwendungsfall herausgearbeitet worden. Aus der Analyse der Kennzeichnungsträger und Identifikatorarten geht als wesentliches Ergebnis hervor, dass für eine durchgängige Identifikation in der Additiven Fertigung eine bauteil- und verfahrensspezifische Kombination aus Kennzeichnungsträger und Identifikatorart erforderlich ist. Je nach Anwendungsfall bestehen differente Anforderungen an die Identifikation, was unterschiedliche Varianten aus Kennzeichnungsträger und Identifikatorart erfordert. Heute existierende Lösungen zur Kennzeichnung ermöglichen keine qualitäts- und anwendungsgerechte Anbringung von Identifikatoren an Bauteilen. Das Definieren der Lage und Position eines Identifikators an einem zu fertigenden Bauteil erfolgt ebenfalls auf Methoden- und Fachwissen des Bedieners. Dieser Missstand ruft das Potenzial hervor, eine (teil-)automatisierte bauteilindividuelle Kennzeichnung im Pre-Prozess zu integrieren, welche zu einer Verkürzung von Durchlaufzeiten und einer erhöhten Qualität im Prozess der kundenindividuellen Additiven Fertigung führt.

Die Analyse zu bestehenden Forschungsansätzen und kommerziellen Softwarelösungen zur Unterstützung des Pre-Prozesses zeigt auf, dass keine Lösungen für eine bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Kennzeichnung und Identifikation in der Additiven Fertigung existieren. In den einzelnen Pre-Prozessschritten

wird weder basierend auf methoden- und verfahrensbedingtem Wissen agiert, noch werden Informationsmodelle zur prozessspezifischen Bereitstellung von notwendigem Wissen verwendet. Darauf aufbauend findet keine durchgängige Nachverfolgung in der kundenindividuellen Additiven Fertigung statt. Anfallende Informationen aus den einzelnen Prozessschritten, wie beispielsweise Ergebnisse aus der Bauteilprüfung, gewählte Bauteilorientierungen und -positionierungen oder Informationen zu den Schichtdaten, werden nicht bauteilindividuell erfasst und verarbeitet.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass bestehende Forschungsansätze und industrielle Umsetzungen keine durchgängige bauteilindividuelle Identifikation von additiv gefertigten Bauteilen erlauben. Insbesondere fehlt hier ein durchgängig vorhandenes Informationsmodell zum methoden- und verfahrensbasierten Agieren in den einzelnen Prozessschritten. Ferner bedarf es einem Werkzeug, welches zu fertigende Objekte bauteilindividuell und verfahrensspezifisch im Pre-Prozess durch eine Kombination aus Kennzeichnungsträger und Identifikator modifiziert.

3 Handlungsbedarf und Anforderungsprofil

In Kapitel 3 wird zunächst der Handlungsbedarf in der bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung beschrieben. Dieser wird aufbauend auf dem analysierten industriellen Stand der Technik und bestehenden Forschungsarbeiten hergeleitet. Hieraus wird im Folgenden die Zieldefinition abgeleitet. Basierend auf der Zieldefinition werden Anwendungsfälle in der bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung detailliert beschrieben und die vorliegenden Systemgrenzen sowie die beteiligten Systemakteure näher erläutert. Aufbauend auf dieser Betrachtung werden verschiedene Anforderungen abgeleitet. Zur Anfertigung des Anforderungsprofils werden etablierte Methoden und Vorgehensweisen nach [181; 198; 201] verwendet.

3.1 Handlungsbedarf

Die Bearbeitung der einzelnen Prozessschritte in der Prozesskette zur bauteilindividuellen Additiven Fertigung (siehe Kapitel 2.1) basiert auf dem Erfahrungswissen der Bediener. Es findet kein informationsmodellbasiertes Agieren statt. Insbesondere die Prozessschritte des Pre-Prozesses unterliegen einem hohen Einfluss des jeweiligen Bedieners. Dies führt zu unterschiedlichen Ergebnissen durch unterschiedliche Bediener. In den Prozessschritten zur Bauteilorientierung und -positionierung werden Bauteile optional manuell gekennzeichnet. Dies bedeutet, der Bediener muss das jeweilige Bauteil manuell mit einer Kennzeichnung modifizieren, ohne über das Wissen einer möglichst optimalen Kennzeichnungsart und räumlichen Lage dieser Kennzeichnung am Bauteil zu verfügen. Weiterhin liegen ihm keine Informationen über die Umsetzbarkeit verschiedener Identifikationsarten beim Einsatz von differentiellen additiven Fertigungsverfahren in Kombination mit unterschiedlichen Nachbearbeitungsverfahren vor. In den meisten Fällen wird bei additiv zu fertigenden Bauteilen heute gänzlich auf eine Kennzeichnung verzichtet. Dies führt zu aufwendigen und kostenintensiven Zuordnungsarbeiten, nachdem die Bauteile physisch hergestellt und weiterverarbeitet werden. Je nach additivem Fertigungsverfahren und Bauteilgrößen werden mehrere hundert Bauteile simultan gefertigt. Diese müssen abschließend dem jeweiligen Kunden zugeordnet werden, nicht nur direkt nach dem In-Prozess, sondern auch während und

nach dem Post-Prozess. Heute findet diese Zuordnung überwiegend papierbasiert statt. Sprich, Kundenauftragsdaten werden manuell durch einen Mitarbeiter mit den realen Bauteilen optisch verglichen, gegebenenfalls vermessen und somit identifiziert. Für eine durchgängige Identifikation sind die Wechselwirkungen zwischen Kennzeichnungsart, Identifikationsart, den eingesetzten Fertigungs- und Nachbearbeitungsverfahren sowie der Bauteilgeometrie unklar. Ferner findet keine durchgängige Identifikation und Verarbeitung von bauteilindividuellen Informationen über den gesamten Prozess statt. Dies führt dazu, dass beispielsweise keine Rückschlüsse von einem auftretenden Bauteilversagen auf etwaige Fehler im Pre-Prozess erschlossen werden können. Weiter ist es nicht möglich, bauteilindividuell Kosten oder den Energieverbrauch oder -verbräuche über den gesamten Prozess zu ermitteln. Derzeitig bestehende Ansätze ermitteln Kosten mittels Pauschalkalkulationen und Energieverbräuche werden aufgrund fehlender Informationen nicht bauteilindividuell ermittelt.

Daher bedarf es einer eindeutigen virtuellen und physischen Identifikation von Bauteilen über den gesamten Prozess der bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Additiven Fertigung hinweg. Dies inkludiert die Bereitstellung eines methoden- und verfahrensbasierten Informationsmodells für die bauteilindividuelle Additive Fertigung sowie eine Methode zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung im Pre-Prozess.

3.2 Zieldefinition

Das übergeordnete Ziel der vorliegenden Dissertation ist die Entwicklung und Bereitstellung einer durchgängigen bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung. Dies beinhaltet eine Anpassung und Erweiterung der Prozesskette zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Additiven Fertigung. Die neuartige Beschreibung der Prozesskette integriert den Prozessschritt zur Kennzeichnung additiv zu fertigender Bauteile. Ziel ist es, eine Methode zur Kennzeichnung von additiv zu fertigenden Bauteilen für den Bediener im Pre-Prozess bereitzustellen. Abhängig von der Bauteilgeometrie und den eingesetzten Verfahren (Fertigungs- und Nachbearbeitungsverfahren) wird ein Kennzeichnungsansatz generiert, der eine Kombination aus Kennzeichnungsträger- und Identifikatorart repräsentiert. Aufbauend auf der Anpassung und Erweiterung der Prozesskette ist eine weitere Zielsetzung die Beschreibung eines bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Informationsmodells. Dieses Modell bildet die während des Gesamtprozesses (Pre-, In- und Post-Prozess) anfallenden und relevanten Informationen ab und integriert diese

über die eingesetzten Verfahren und das individuelle Bauteil. Über die Verknüpfung der Bauteilinformationen mit den Verfahren werden den Teilprozessen im Pre-Prozess zusätzliche Informationen bereitgestellt und in einer Datenbank gespeichert. Ein weiteres Ziel ist es, basierend auf dem Informationsmodell und der neu entwickelten Methode zur Kennzeichnung eine durchgängige Identifikation zu integrieren. Aufbauend hierauf wird ein rechnergestütztes System entwickelt, das dem Anwender die durchgängige Identifikation von additiv gefertigten Bauteilen bereitstellt. Somit wird beispielsweise ermöglicht, anhand der gesammelten Daten bauteilindividuell Kosten und Energiebedarfe zu ermitteln sowie die Wechselwirkungen zwischen Bauteilversagen in der Nutzung und dem Pre-Prozess bereitzustellen.

3.3 Betrachtete Anwendungsfälle

Zur vollständigen Problemspezifikation sollen neben der definierten Zielsetzung Anwendungsfälle für die bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Identifikation definiert werden. In der Softwareentwicklung finden hier Anwendungsfalldiagramme nach Notation der Unified Modeling Language (UML) Anwendung [45; 211; 249]. Hier wird das Systemverhalten aus Sicht der beteiligten Akteure grafisch modelliert und beschrieben. Das Anwendungsfalldiagramm beschreibt die Akteure, Anwendungsfälle und Beziehungen zwischen diesen Elementen innerhalb des gesetzten Systems [181]. Das Anwendungsfalldiagramm für die bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Identifikation für die Additive Fertigung ist in Abbildung 3-1 dargestellt.

Systemgrenze

Die Systemgrenzen der vorliegenden Untersuchung beziehen die durchgängige Informationsverarbeitung vom Dateneingang über den Pre-Prozess bis hin zur Fertigung und Nachbearbeitung der additiv gefertigten Bauteile ein. Über die Systemgrenzen werden Informationen transferiert und Ausführungen durch die beteiligten Akteure getätigt.

Systemakteure

Die Systemakteure im Anwendungsfallkontext sind der Kunde, der Mitarbeiter im Pre-Prozess, der Mitarbeiter im In-Prozess, der Mitarbeiter im Post-Prozess und die Software-Applikation. Die beteiligten Akteure sind eindeutig identifizierbare

Personen oder virtuelle Systeme bzw. Objekte. In Abbildung 3-1 sind die Akteure außerhalb der Systemgrenzen dargestellt.

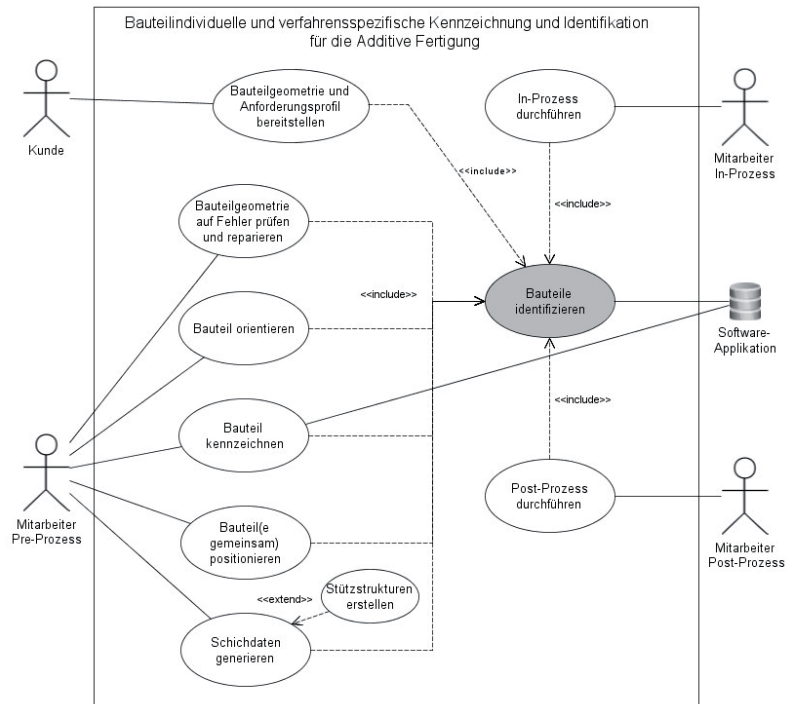


Abbildung 3-1: Anwendungsfalldiagramm der bauteilindividuellen Additiven Fertigung

Systemgrenze

Die Systemgrenzen der vorliegenden Untersuchung beziehen die durchgängige Informationsverarbeitung vom Dateneingang über den Pre-Prozess bis hin zur Fertigung und Nachbearbeitung der additiv gefertigten Bauteile ein. Über die Systemgrenzen werden Informationen transferiert und Ausführungen durch die beteiligten Akteure getätigt.

Systemakteure

Die Systemakteure im Anwendungsfallkontext sind der Kunde, der Mitarbeiter im Pre-Prozess, der Mitarbeiter im In-Prozess, der Mitarbeiter im Post-Prozess und die Software-Applikation. Die beteiligten Akteure sind eindeutig identifizierbare

Personen oder virtuelle Systeme bzw. Objekte. In Abbildung 3-1 sind die Akteure außerhalb der Systemgrenzen dargestellt.

Der *Kunde* repräsentiert im Anwendungsfalldiagramm den Auftraggeber für die Additive Fertigung. Er kann sowohl externer Kunde als auch interner Kunde sein, beispielsweise aus einer unternehmensinternen Abteilung. Hauptaufgabe ist das Bereitstellen der zu fertigenden Bauteilgeometrie und Definition des zugehörigen Anforderungsprofils.

Der *Mitarbeiter im Pre-Prozess* bearbeitet alle dem Pre-Prozess zugehörigen Prozessschritte. Er initiiert die rechnergestützte Vorbereitung zur Additiven Fertigung und muss hier den essentiellen Prozessschritt der Bauteilkennzeichnung unter Berücksichtigung des Anforderungsprofils des Kunden durchführen.

Der *Mitarbeiter im In-Prozess* bereitet die additive Fertigungsanlage für den Bauprozess vor und überwacht die gesamte Fertigung während der Herstellungsdauer. Nach Beendigung des Bauprozesses entnimmt der *Mitarbeiter im In-Prozess* die Bauplattform bzw. den gefertigten Bauraum aus der Fertigungsanlage.

Der *Mitarbeiter im Post-Prozess* führt alle Tätigkeiten zur Nachbearbeitung von additiv gefertigten Bauteilen durch. Hierzu zählt auch die Zuordnung der Bauteile zu dem jeweiligen Kunden. Er bereitet die Bauteile für die Weitergabe bzw. den Versand an den Kunden vor.

Die *Software-Applikation* stellt die rechnergestützten Systeme zur Erstellung der Bauteilkennzeichnung sowie zur durchgängigen Identifikation bereit. Dies inkludiert sowohl das Informationsmodell und darauf aufbauende Datenbanken als auch die Bereitstellung der erforderlichen Kommunikationswege. Die rechnergestützten Systeme zur Bearbeitung der restlichen Pre-Prozessschritte werden im Rahmen dieser Dissertation nicht näher betrachtet. Hier wird auf den Stand der Technik und Forschung aufgesetzt, siehe Kapitel 2.6. Darunter fallen die Rechnerunterstützung für die Bauteilprüfung, die Bauteilorientierung, die Bauteilpositionierung und die Stützstruktur- und Schichtdatengenerierung. Die *Software-Applikation* im Anwendungsfalldiagramm kommuniziert mit den bestehenden Lösungen und tauscht mit diesen Informationen aus.

Anwendungsfälle

Das Anwendungsfalldiagramm, siehe Abbildung 3-1, besteht aus zehn Anwendungsfällen, welche zum Teil untereinander *Include*- oder *Extend*-Beziehungen aufweisen [149]. Eine *Include*-Beziehung (dt.: Enthält-Beziehung) beschreibt,

dass ein Anwendungsfall immer einen weiteren Anwendungsfall aufruft. Die Extend-Beziehung (dt.: Erweiterungsbeziehung) beschreibt, dass ein Anwendungsfall optional durch einen anderen Anwendungsfall erweitert werden kann. Im Folgenden werden die Anwendungsfälle des Anwendungsfalldiagramms detailliert beschrieben. Als Hauptanwendungsfall wurde der Anwendungsfall *Bauteile identifizieren* ermittelt, dieser wird ebenfalls im weiteren Verlauf detailliert dargestellt.

Bauteilgeometrie und Anforderungsprofil bereitstellen: Der auslösende Anwendungsfall für den Gesamtprozess umfasst die Bereitstellung der Bauteilgeometrie in Form von 3D-Geometriedaten und die Bereitstellung des Anforderungsprofils. In diesem Profil werden Anforderungen an das Fertigungsverfahren, die Nachbearbeitungsverfahren sowie optionale Anforderungen an die zu wählende Kennzeichnungs- und Identifikationsart durch den Kunden definiert. Die Software-Applikation vergibt dem Kundenauftrag nach Eingang der Daten eine Identifikationsnummer.

Bauteilgeometrie auf Fehler prüfen und reparieren: In diesem Anwendungsfall prüft der Mitarbeiter im Pre-Prozess das 3D-Geometriemodell auf Fertigbarkeit und repariert etwaig vorliegende Fehler in Absprache mit dem Kunden in der Bauteilgeometrie. Die Prüfung erfolgt in diesem Anwendungsfall verfahrensspezifisch. Dies bedeutet, dass abhängig vom eingesetzten Fertigungsverfahren differente Prüfkriterien zum Tragen kommen.

Bauteil orientieren: In diesem Anwendungsfall werden die zu fertigenden Bauteile in einem virtuellen Bauraum einzeln orientiert. Die Orientierung umfasst die Rotation um die drei Koordinatenachsen x_{BT} , y_{BT} und z_{BT} des Bauteils.

Bauteil kennzeichnen: Dieser Anwendungsfall ist nach dem Anwendungsfall *Bauteile identifizieren* der wichtigste Anwendungsfall im Gesamtkontext der bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Additiven Fertigung. Der Mitarbeiter des Pre-Prozesses modifiziert basierend auf dem Anforderungsprofil und rechnergestützt durch die Software-Applikation das additiv zu fertigende Bauteil. Ergebnis ist die Erweiterung der Bauteilgeometrie um den optimalen Kennzeichnungsansatz, bestehend aus Kennzeichnungsträger und Identifikatorart.

Bauteil(e gemeinsam) positionieren: In diesem Anwendungsfall werden durch den beteiligten Akteur die gekennzeichneten Bauteile in einem virtuellen Bauraum positioniert. Die Positionierung umfasst hierbei die Translation entlang der drei Koordinatenachsen x_{BR} , y_{BR} und z_{BR} des Bauraums. Verfahrensspezifisch und abhängig von der Bauteil- und Bauraumgröße werden die Bauteile simultan oder sequentiell positioniert und gefertigt.

Schichtdaten generieren: Dieser Anwendungsfall umfasst die Generierung der maschinenlesbaren Schicht- und Fertigungsinformationen. Der beteiligte Akteur arbeitet rechnergestützt und basierend auf dem Anforderungsprofil die notwendigen Informationen. Wie bereits im Stand der Technik dargelegt, kann das *Generieren der Schichtdaten* in Sonderfällen auch direkt auf der Fertigungsanlage passieren, in diesem Fall übernimmt der *Mitarbeiter im In-Prozess* diesen Anwendungsfall.

Stützstrukturen erstellen: Dieser Anwendungsfall ist eine Erweiterung (Extend-Beziehung) des Anwendungsfalls *Schichtdaten generieren*. Basierend auf dem Anforderungsprofil des Kunden werden je nach eingesetztem Fertigungsverfahren Stützstrukturen zur Fertigung benötigt, dieser Anwendungsfall ist dementsprechend verfahrensspezifisch.

In-Prozess durchführen: In diesem Anwendungsfall werden die Bauteile mittels einer additiven Fertigungsanlage physisch hergestellt.

Bauteile identifizieren: Der Hauptanwendungsfall interagiert mit allen anderen Anwendungsfällen, er steht mit Include-Beziehungen mit diesen in Verbindung. Alle in den Prozessschritten anfallenden Informationen werden im Anwendungsfall *Bauteile identifizieren* verarbeitet und basierend auf der *Software-Applikation* gespeichert und aktualisiert. Zugehörig zu der im Anwendungsfall *Bauteilgeometrie und Anforderungsprofil bereitstellen* vergebenen Identifikationsnummer werden Modifikationen der Bauteilgeometrie sowie Prüfdaten, festgesetzte Orientierungen und Positionierungen sowie die erzeugten Schichtdaten bauteilindividuell verarbeitet. Neben der virtuellen Identifikation werden die Bauteile nach dem *In-Prozess* und während des *Post-Prozesses* auch über die hinzugefügte Kennzeichnung am Bauteil physisch identifiziert beispielsweise durch Auslesen von Identifikatoren mittels optischen Identifikationssystemen.

Post-Prozess durchführen: In diesem Anwendungsfall werden die additiv gefertigten Bauteile je nach gegebenem Anforderungsprofil nachbearbeitet und für den Versand bzw. die Weitergabe vorbereitet.

3.4 Anforderungen

Aufbauend auf dem analysierten Stand der Technik, dem hergeleiteten Handlungsbedarf samt abgeleiteter Zieldefinition und der Anwendungsfälle zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung wird nachfolgend das Anforderungsprofil definiert. Das

Profil ist in die vier Anforderungsbereiche *Anforderungen an die Methode zur Bauteilkennzeichnung*, *Anforderungen an das Informationsmodell*, *Anforderungen an die durchgängige Identifikation* sowie *Anforderungen an die Implementierung* gegliedert. Jeder dieser Anforderungsbereiche enthält spezifische Anforderungen, diese werden in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

3.4.1 Anforderungen an die Methode zur Bauteilkennzeichnung

Die Methode zur Kennzeichnung der additiv zu fertigenden Bauteile dient zur Identifikation jener Bauteile nach der Beendigung des In-Prozess und während sowie nach dem durchgeführten Arbeiten im Post-Prozess. Sie erlaubt das Identifizieren der realen Bauteile und ermöglicht somit die Rückführung anfallender Informationen im In- und Post-Prozess in die virtuelle Repräsentation der Bauteile. Die Anforderungen an die bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Methode zur Kennzeichnung werden nachfolgend beschrieben.

Anforderung 1:

Die Methode zur Kennzeichnung muss bauteilindividuell und verfahrensspezifisch einen Kennzeichnungsansatz bestehend aus Kennzeichnungsträger und Identifikator definieren.

Die Anbringung eines Kennzeichnungsansatzes an die additiv zu fertigenden Bauteile setzt sich aus einer möglichen Kennzeichnungsträgerart, welche einer geometrischen Beschreibung gleichgesetzt werden kann, und einer Identifikatorart zusammen. Letztere bestimmt die Art der Identifikation, beispielsweise die Verwendung von Klarschrift, 2D-Codierungen oder die Verwendung von elektromagnetischen Identifikationsarten [126; 129]. Die Methode zur Kennzeichnung der Bauteilmodelle muss diesen Kombinationsansatz als Auswahlgrundlage definieren und verarbeiten. Die Kombinationen aus Kennzeichnungsträger (K) und Identifikatorart (I) sollen dabei mit folgender Indizierung gebildet werden:

$$K_i I_j \text{ mit } i = 1, \dots, m \text{ und } j = 1, \dots, n$$

Anforderung 2:

Die Methode zur Kennzeichnung muss basierend auf dem Informationsmodell die technische Machbarkeit möglicher Kombinationen aus Kennzeichnungsträger und Identifikator nachweisen und bereitstellen.

Essentielle Grundlage für die Auswahl des Kennzeichnungsansatzes stellt die technische Machbarkeit realisierbarer Lösungskombinationen aus Kennzeichnungsträger und Identifikatorart dar. Losgelöst vom Bauteil und eingesetzten Fertigungs-

und Nachbearbeitungsverfahren müssen technisch umsetzbare Kombinationen methodisch hergeleitet und strukturiert in Form einer Basismenge zur Verfügung gestellt werden. Aufbauend auf dieser Machbarkeitsmatrix soll die Methode zur Kennzeichnung die weiteren Prozessschritte absolvieren.

Anforderung 3:

Die Methode zur Kennzeichnung muss basierend auf der Bauteilgeometrie die Lösungsmenge in Frage kommender Kombinationen aus Kennzeichnungsträger und Identifikator vorgeschaltet minimieren.

Anforderung 4:

Die Methode zur Kennzeichnung muss basierend auf dem Anforderungsprofil des Kunden die Lösungsmenge in Frage kommender Kombinationen aus Kennzeichnungsträger und Identifikator vorgeschaltet minimieren.

Um das vorliegende Auswahlverfahren für die bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Kennzeichnung in seiner Komplexität zu minimieren, soll der Auswahl der räumlichen Lage der Kennzeichnung eine Minimierung der Lösungskombinationen, aufbauend auf der Machbarkeitsmatrix, vorgeschaltet werden. Diese Reduktion muss zum Ergebnis eine Lösungskombination hervorbringen, mit der die Methode weiterarbeitet. Zu betrachtende Auswahlkriterien zur Minimierung sollen sowohl die Bauteilgeometrie durch eine geometrisch und topologische Analyse, als auch vom Kunden getroffene Anforderungen hinsichtlich der zu wählenden Fertigungs- und Nachbearbeitungsverfahren sein.

Anforderung 5:

Die Methode zur Kennzeichnung muss optionale Anforderungen durch den Kunden berücksichtigen und verarbeiten.

Anforderung 6:

Die Methode muss das prozessintegrierte Kennzeichnen der Bauteile im In-Prozess ermöglichen.

Für den Anwendungsfall, dass der Kunde den anzubringenden Kennzeichnungsansatz fest definiert, muss die Methode diese optionalen Anforderungen berücksichtigen und in das Auswahlverfahren integrieren. Um den Prozess kostengünstig und schlank zu halten, sollen keine zusätzlichen Prozessschritte für die Kennzeichnung der Bauteile in den Gesamtprozess integriert werden. Die physische Kennzeichnung muss prozessintegriert während der Additiven Fertigung im In-Prozess ablaufen.

Anforderung 7:

Die Methode zur Kennzeichnung muss die Festlegung der räumlichen Lage des Kennzeichnungsansatzes auf geometrischer und topologischer Basis lösen.

Zur Additiven Fertigung der kundenindividuellen Bauteile muss die Methode den gewählten Kennzeichnungsansatz im 3D-Bauteilmodell integrieren und mathematisch in diesem Modell beschreiben. Die räumliche Lage des Kennzeichnungsansatzes im 3D-Bauteilmodell basiert auf geometrischen und topologischen Abfragen. Der Ablauf der Methode soll dabei auf der Analyse von Facettenmodellen erfolgen. Diese repräsentieren B-Rep-Modelle mit einem eingeschränkten Vorrat an Grundelementen. Basis zur Durchführung der Methode soll u. a. die Euler-Poincaré-Formel bilden:

$$V - E + F = 2 \cdot (S - R) + H$$

Mit: V = Anzahl der Eck-/Endpunkte (Vertices),

E = Anzahl der Kanten (Edges),

F = Anzahl der Flächen (Faces),

S = Anzahl der äußeren oder inneren Oberflächen (Shells),

R = Anzahl der „Volumendurchbrüche“ im Körper (Rings) und

H = Anzahl der „Löcher“ in den Flächen (Holes).

Anforderung 8:

Die Methode zur Kennzeichnung muss das Bauteilgeometriemodell basierend auf Gestaltungsregeln durch den ausgewählten Kennzeichnungsansatz erweitern.

Je nach gewähltem Kennzeichnungsträger kommen differente und spezifische Abläufe in der Methode zu tragen. Die Umsetzung und Verarbeitung unterschiedlicher Informationsmengen, in Abhängigkeit des Kennzeichnungsträgers, müssen in der Methode in Form eines Auswahlalgorithmus bereitgestellt werden. Dabei soll basierend auf Regeln zur Kennzeichnung gearbeitet werden, diese Regeln ermöglichen eine sichere Fertigung sowie die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Dabei muss die verfahrensspezifische Auflösung berücksichtigt werden. Hierdurch wird gewährleistet, dass die gefertigten Identifikatoren samt Kennzeichnungsträger identifizierbar sind. Ergebnis dieses Algorithmus ist das modifizierte Bauteil für die weitere Verarbeitung in der Prozesskette.

Anforderung 9:

Die Methode zur Kennzeichnung soll das Modifizieren einer endlichen Menge an zu fertigenden Bauteilen sequentiell verarbeiten können.

Die Additive Fertigung stellt, wie beschrieben, eine simultane Fertigung dar, sprich es wird eine endliche Menge an Bauteilen parallel in einem Bauprozess gefertigt. Die Methode soll basierend auf einer Abfrage nach weiteren zu fertigenden Bauteilen iterativ alle weiteren Bauteile hinsichtlich des anzubringenden Kennzeichnungsansatzes modifizieren.

3.4.2 Anforderungen an das Informationsmodell

Die durchgängige Identifikation funktioniert in Interaktion mit einer Software-Applikation. Hier werden wie beschrieben die relevanten Informationen für die bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Identifikation verarbeitet. Für die formale Beschreibung der relevanten Informationen, welche aus Daten und deren Beziehungen untereinander bestehen, ist ein Informationsmodell erforderlich. Das Informationsmodell bietet die Möglichkeit, die Informationen zu Bauteilgeometrie und Anforderungsprofil strukturiert zu repräsentieren. Weiterhin sollen die relevanten Informationen zur zugehörigen Identifikationsnummer in den einzelnen Prozessschritten strukturiert verarbeitet und beschrieben werden. Die Anforderungen an die digitale Repräsentation des Informationsmodells werden im Folgenden vorgestellt.

Anforderung 10:

Das Informationsmodell muss modular aufgebaut und erweiterbar sein.

Durch eine steigende Anzahl der abzubildenden Informationen im Informationsmodell steigt die Komplexität in jenem Modell. Dies erfordert Strukturierungsmaßnahmen, um die Erweiterung des Informationsmodells zu vereinfachen. Daher muss das Modell in sogenannte Partialmodelle klassifiziert werden [106]. Bei neu auftretenden Prozessschritten und Informationsinhalten sind die Partialmodelle jederzeit modular erweiterbar. Ein gemeinsames Kernmodell integriert die relevanten Informationen aus den disjunkten Partialmodellen und stellt diese bedarfsgerecht zur Verfügung.

Anforderung 11:

Die Kerninformationen zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation in der Additiven Fertigung müssen im Kernmodell abgebildet werden.

Die Vermeidung einer redundanten Datenhaltung im Informationsmodell wird durch das Abbilden der relevanten Informationen direkt im Kernmodell erreicht. Zu diesen eindeutig beschreibenden und relevanten Daten gehören die Bauteilgeometrie sowie das Anforderungsprofil. Der Zugriff und die Zuordnung zu den einzelnen Partialmodellen wird anhand der eindeutigen Identifikationsnummer des kundenindividuellen Bauteils durch das Kernmodell integriert.

Anforderung 12:

Das Informationsmodell muss die zu fertigende Bauteilgeometrie enthalten.

Im Informationsmodell muss die vom Kunde bereitgestellte zu fertigende Bauteilgeometrie abgebildet werden können. Diese wird beim Eingang der Auftragsdaten mit einer Identifikationsnummer versehen und muss für den gesamten weiteren Prozess der bauteilindividuellen Additiven Fertigung bereitgestellt werden. Modifikationen an dieser Bauteilgeometrie müssen im Informationsmodell revisionierbar abgebildet werden.

Anforderung 13:

Das Informationsmodell muss das Anforderungsprofil des Kunden abbilden.

Zugehörig zur kundenspezifischen Bauteilgeometrie muss im Informationsmodell das Anforderungsprofil für die Additive Fertigung repräsentiert werden. Das Anforderungsprofil enthält Informationen zum Fertigungsverfahren und zu Anwendung findenden Nachbearbeitungsverfahren. Zusätzlich sollen optionale Anforderungen an die Fertigung beschrieben werden. Hierzu zählen beispielsweise Anforderungen an die Kennzeichnungs- und Identifikationsart durch den Kunden. Die Bauteilgeometrie und das Anforderungsprofil müssen im Informationsmodell in direkter Relation stehen.

Anforderung 14:

Das Informationsmodell muss Attribute und Eigenschaften zur Bauteilprüfung abbilden, insbesondere gewählte verfahrensspezifische Prüfkriterien.

Es müssen bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Prüfkriterien und Prüfergebnisse abgebildet werden können. Diese werden von der Bauteilprüfung im Pre-Prozess festgelegt und müssen für die durchgängige Identifikation bauteilindividuell bereitgestellt werden.

Anforderung 15:

Das Informationsmodell muss Attribute und Eigenschaften der Bauteilorientierung und -positionierung abbilden, insbesondere die bauteilindividuelle modifizierte Rotation und Translation.

Die festgelegten Bauteilorientierungen und -positionierungen werden über die Rotation um das Bauteilkoordinatensystem bzw. die Translation entlang des Bauraumkoordinatensystems im Pre-Prozess festgelegt und stehen bauteilindividuell zur Verfügung. Die Bauteilorientierung basiert auf verfahrensspezifischen Optimierungsgrößen und beschreibt die Rotation des Bauteils um seine Koordinatenachsen x_{BT} , y_{BT} und z_{BT} . Die Bauteilpositionierung basiert gleichermaßen auf verfahrensspezifischen Optimierungsgrößen und beschreibt die Translation des Bauteils im virtuellen Bauraum über die Bauraumkoordinatenachsen x_{BR} , y_{BR} und z_{BR} . Die jeweiligen Optimierungsgrößen und die bauteilindividuellen Orientierungen und Positionierungen im Bauraum müssen im Informationsmodell abgebildet und für die durchgängige Identifikation bereitgestellt werden.

Anforderung 16:

Das Informationsmodell muss den bauteilindividuellen und verfahrensspezifisch gewählten Kennzeichnungsansatz abbilden und über das Kernmodell integrieren.

Das Bauteil muss zur durchgängigen virtuellen und physischen Identifikation durch einen Kennzeichnungsansatz im Pre-Prozess modifiziert werden. Bauteilindividuell und verfahrensspezifisch wird eine Kombination aus Kennzeichnungsträger und Identifikator ausgewählt und diese dem Bauteil adaptiert. Die Informationen zu Kennzeichnungsträger und Identifikationsart sowie zur räumlichen Lage des Kennzeichnungsansatzes müssen im Informationsmodell abgebildet werden. Ferner müssen diese strukturierten Informationen für die durchgängige Identifikation bereitgestellt werden.

Anforderung 17:

Das Informationsmodell muss Informationen der etwaig anfallenden Stützstrukturgenerierung und Schichtdatenerstellung enthalten.

Im Pre-Prozess werden je nach Verfahren Stützstrukturen generiert. Darauf aufbauend werden Schichtdaten erstellt und an den In-Prozess weitergegeben. Die Informationen zu gegebenenfalls erforderlichen Stützstrukturen und zu den er-

stellten Schichtdaten müssen samt den verwendeten Parametern im Informationsmodell repräsentiert und für die durchgängige Identifikation zur Verfügung gestellt werden.

Anforderung 18:

Das Informationsmodell muss Informationen aus dem In- und Post-Prozess über das Kernmodell integrieren und bereitstellen.

Fertigungs- und Nachbearbeitungsrestriktionen bestimmen die Limitationen der Verfahren in Bezug auf die Verwendung von Kennzeichnungs- und Identifikationsarten. Diese Informationen sind aus dem In- und Post-Prozess bekannt und müssen für die durchgängige Informationsbereitstellung im Informationsmodell abgebildet werden. Insbesondere die Integration dieser Informationen in die Bauteilkennzeichnung sind von essentieller Bedeutung. Ferner sollen auch Informationen aus der Nutzung und dem Lebenszyklusende integriert werden.

Anforderung 19:

Das Informationsmodell muss die durchgängige Identifikation in der Additiven Fertigung gewährleisten.

Basis für die durchgängige Identifikation bildet die bauteilindividuelle formale Abbildung der Daten- und Beziehungsstrukturen im Informationsmodell. Für die Integration dieser Strukturen muss das Informationsmodell ein Schema zur eindeutigen und redundanzfreien Informationsverarbeitung und Nachverfolgung über den gesamten Prozess bereitstellen.

3.4.3 Anforderungen an die durchgängige Identifikation

Der in Kapitel 3.3 identifizierte Hauptanwendungsfall *Bauteile identifizieren* steht in direkter bidirektionaler Verbindung mit den beteiligten Anwendungsfällen bzw. Prozessschritten. Er bildet in Verbindung mit der Software-Applikation die Basis für die durchgängige bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Identifikation für die Additive Fertigung. Für die Verknüpfung von prozessschrittspezifischen Informationen und dem kundenindividuellen Bauteil samt Anforderungsprofil muss ein Identifikationskonzept entwickelt werden, welches eine durchgängige Vorgehensweise über den gesamten Prozess bereitstellt. Die Anforderungen zur Definition einer durchgängigen Identifikation werden nachstehend dargestellt.

Anforderung 20:

Die durchgängige Identifikation muss anhand einer einmalig vergebenen und somit eindeutigen Identifikationsnummer erfolgen.

Zur durchgängigen Identifikation in der Additiven Fertigung muss zu Anfang des Prozesses eine einmalige und eindeutig zuordnungsbare Nummer zum jeweiligen Kundenauftrag vergeben werden. Diese Nummer referenziert die relevanten Auftragsdaten vom Kunden zu den in einer Datenbank hinterlegten Informationen. Zu Anfang werden der eindeutigen Nummer die Kundeninformationen in Form von Stammdaten, die Bauteilinformationen sowie das Anforderungsprofil zugeschrieben. Eine Abfrage der eindeutigen Identifikationsnummer erfolgt über die Software-Applikation basierend auf dem Informationsmodell und der Datenbank.

Anforderung 21:

Die durchgängige Identifikation muss auf der Struktur des Informationsmodells aufbauen.

Die durchgängige Identifikation muss strukturell und informationstechnisch auf dem Informationsmodell und der darauf implementierten Datenbank aufbauen. Hier müssen zur Integration der bauteilindividuellen Informationen Schnittstellen definiert werden.

Anforderung 22:

Die durchgängige Identifikation muss die Bereitstellung der bauteilindividuellen Informationen bis zum Lebenszyklusende des Bauteils bereitstellen.

Über den primären Prozess der bauteilindividuellen Additiven Fertigung hinaus sollen ebenfalls Informationen aus der Nutzung und dem darauffolgenden Lebenszyklusende in der durchgängigen Identifikation berücksichtigt werden. Je nach gewähltem Kennzeichnungsansatz muss eine Vorgehensweise bereitgestellt werden, die es erlaubt, Informationen aus eben diesen Phasen der eindeutigen Identifikationsnummer zuzuschreiben und somit die bauteilindividuellen Informationen in der Datenbank zu aktualisieren.

Anforderung 23:

Die durchgängige Identifikation muss dem Bauteil die individuellen Informationen aus den durchlaufenen virtuellen Prozessschritten eindeutig zuordnen.

Ziel der durchgängigen Identifikation ist unter anderem die eindeutige Zuordnung von physisch hergestellten Bauteilen zu den eingegangenen Kundenaufträgen und

den prozessschrittspezifischen Informationen. Darüber hinaus sollen basierend auf der durchgängigen Identifikation Bauteilkosten und Energieverbräuche bauteilindividuell bestimmt werden können, auch das Rückschließen von etwaig auftretenden Bauteilversagen auf die durchgeführten Prozessschritte muss berücksichtigt werden. Um diese Ziele zu erreichen, muss die durchgängige Identifikation die relevanten bauteilindividuellen Informationen aus dem durchlaufenen Pre-Prozess eindeutig der vergebenen Identifikationsnummer zuordnen und in einer Datenbank ablegen und stetig aktualisieren. Zu den hier anfallenden Informationen gehören neben der Bauteilgeometrie in verschiedenen prozessschrittspezifischen Versionen:

- gewählte Prüfkriterien und bauteilindividuelles Prüfergebnis in der Bauteilprüfung,
- gewählte Optimierungsgrößen und bauteilindividuelle Orientierung in der Bauteilorientierung,
- ausgewählter Kennzeichnungsansatz samt räumlicher Lage im Bauteilmodell in der Bauteilkennzeichnung,
- gewählte Optimierungsgrößen und bauteilindividuelle Positionierung in der Bauteilpositionierung und
- generierte Stützstrukturen, sofern diese verfahrensspezifische Verwendung finden, und Schichtdaten samt verwendeter Parametersätze.

Anforderung 24:

Die durchgängige Identifikation muss das physische Auslesen von Identifikationsarten im In- und Post-Prozess unterstützen und integrieren.

Um die Durchgängigkeit zu gewährleisten, müssen neben den Informationen aus dem Pre-Prozess die relevanten Informationen aus dem In- sowie Post-Prozess integriert werden. Nach Beendigung des Pre-Prozesses findet ein Medienbruch in der Informationsverarbeitung statt, die Identifikation erfolgt nicht mehr ausschließlich virtuell. Durch das physische Fertigen und Nachbearbeiten der Bauteile muss die durchgängige Identifikation demnach eine Vorgehensweise bereitstellen, welche es erlaubt die physischen Bauteile zu identifizieren, beispielsweise durch optisches Auslesen der Bauteile, und darauf aufbauend die zugehörigen Informationen in der Datenbank zu aktualisieren.

Anforderung 25:

Die durchgängige Identifikation soll eine Vorgehensweise definieren, die es erlaubt, Wechselwirkungen von Bauteildefekten in der Nutzung und durchgeführten bauteilindividuellen Pre-Prozessschritten aufzuzeigen.

Anforderung 26:

Die durchgängige Identifikation soll eine Vorgehensweise definieren, die es erlaubt, bauteilindividuelle Energiebedarfe zu ermitteln.

Anforderung 27:

Die durchgängige Identifikation soll eine Vorgehensweise definieren, die es erlaubt, bauteilindividuelle Kosten zu ermitteln.

Basierend auf den bauteilindividuellen Informationen aus den beteiligten Prozessschritten soll die durchgängige Identifikation Vorgehensweisen bereitstellen, welche es erlauben höherwertige Informationen für den Nutzer zu generieren. Zu diesen höherwertigen Informationen gehören das Aufzeigen von Wechselwirkungen zwischen Bauteildefekten und Pre-Prozessschritten sowie die Ermittlung bauteilindividueller Energieverbräuche und Kosten. Die durchgängige Identifikation soll im Rahmen der Dissertation die Grundlage für die Ableitung dieser Informationen bilden und dem Anwender über die Software-Applikation bereitstellen.

3.4.4 Anforderungen an die Implementierung

Die Implementierung stellt die Umsetzung des Gesamtkonzeptes bestehend aus Methode zur Kennzeichnung, Informationsmodell und durchgängiger Identifikation dar. Zur Unterstützung dieser Bereiche muss das Gesamtkonzept durch die Implementierung einer Software-Applikation für den Benutzer integriert werden. Die Anforderungen an die Implementierung werden im Folgenden vorgestellt.

Anforderung 28:

Die Software-Applikation muss die durchgängige Identifikation von bauteilindividuellen Informationen in Form eines Nachverfolgungssystems bereitstellen.

Die Software-Applikation beinhaltet ein Nachverfolgungssystem, welches dem Nutzer bauteilindividuelle Informationen visualisieren muss. Hierzu zählen die Stammdaten des Kunden, Auftragsinformationen sowie die dreidimensionale Darstellung des Bauteilmodells und die Präsentation des Anforderungsprofils. Diese

Informationsübersicht basiert auf dem Informationsmodell und der darauf aufbauenden Datenbank. Das Nachverfolgungssystem muss die Verarbeitung dieser Daten und Informationen erlauben. Hierzu zählen die Suchfunktion nach bauteilindividuellen Informationen, die Editierung, Speicherung, Archivierung sowie der Export der Informationen [20].

Anforderung 29:

Die Software-Applikation muss eine Datenschnittstelle für die domänenspezifische Anwendungssoftware bereitstellen.

Für die Teilprozesse der bauteilindividuellen Additiven Fertigung existieren domänenspezifische Anwendungssysteme für die Bauteilprüfung, die Bauteilorientierung und -positionierung, die Bauteilkennzeichnung, die Schichtdatengenerierung sowie für den In- und Post-Prozess. Die Software-Applikation muss daher eine Schnittstelle bereitstellen, über welche die Daten für die einzelnen Systeme abgerufen und die generierten und aktualisierten bauteilindividuellen Informationen in die Datenbank zurückgeführt werden können.

Anforderung 30:

Die Software-Applikation muss eine grafische Benutzungsoberfläche zur Interaktion und Navigation bereitstellen.

Zur Benutzung der Software-Applikation muss diese eine grafische Benutzungsoberfläche besitzen, welche die geforderten Funktionalitäten intuitiv durch den Benutzer aufrufen lässt. Um dies zu erreichen, muss die Applikation den Anforderungen nach ISO 13407 *Benutzer-orientierte Gestaltung interaktiver Systeme* [73] und EN ISO 9241-110 *Grundsätze der Dialoggestaltung* [85] gerecht werden. Hierzu zählen unter anderem Anforderungen an die Selbstbeschreibungsfähigkeit, Steuerbarkeit, Erwartungskonformität, Lernförderlichkeit und Individualisierbarkeit der Software-Applikation [85].

Anforderung 31:

Die Software-Applikation muss die bauteilindividuellen Informationen aus dem Pre-Prozess über das Nachverfolgungssystem präsentieren.

Das Nachverfolgungssystem muss die Repräsentation der bauteilindividuellen Informationen aus den Pre-Prozessschritten in eine menschenles- und interpretierbare Präsentation transformieren. Das Nachverfolgungssystem muss darauf aufbauend eine Funktion bereitstellen, die es ermöglicht, die bauteilindividuellen In-

formationen zu den einzelnen durchlaufenen Pre-Prozessschritten sichtenspezifisch abzubilden. Dies inkludiert die Visualisierung der Informationen aus Bauteilprüfung, Bauteilorientierung und -positionierung, Bauteilkennzeichnung und Schichtdatengenerierung.

Anforderung 32:

Die Software-Applikation muss die bauteilindividuellen Informationen aus dem In- und Post-Prozess sowie der Nutzung und dem Lebenszyklusende über das Nachverfolgungssystem präsentieren.

Zur vollständigen Beschreibung und Nachvollziehbarkeit der bauteilindividuellen Additiven Fertigung muss das Nachverfolgungssystem die Präsentation mit den Informationen zur physischen Fertigung und Nachbearbeitung der Bauteile sowie den Informationen aus der Nutzung und dem Lebenszyklusende komplettieren. Hierdurch wird die ganzheitliche Betrachtungsweise des Gesamtprozesses für den Benutzer ermöglicht.

Anforderung 33:

Die Software-Applikation soll die bauteilindividuellen Informationen zur Kostenzusammensetzung, zum Energiebedarf und Rückschlüssen auf ein Bauteilversagen visualisieren.

Die Funktionalitäten zur bauteilindividuellen Kosten- und Energiebedarfsbestimmung sollen aufbauend auf der durchgängigen Identifikation und den hinterlegten Informationen im Nachverfolgungssystem dargestellt werden. Hierzu sollen dem Benutzer die Kosten- und Energieverbrauchstreiber den einzelnen Prozessschritten zugeordnet angezeigt werden. So können für Folgeprozesse weitere Optimierungspotenziale in der bauteilindividuellen Additiven Fertigung abgeleitet werden. Ferner werden die tatsächlichen Kosten und Energieverbräuche zur aufgerufenen Identifikationsnummer visualisiert. Hierauf aufbauend können im Folgenden direkt betriebswirtschaftliche Prozessschritte, beispielsweise Rechnungstellungen gestartet werden. Eine weitere Funktionalität umfasst das Präsentieren von Wechselwirkungen zwischen auftretendem Bauteilversagen und den durchlaufenen Prozessschritten. Hier soll im Rahmen der vorliegenden Dissertation die Grundlage für diese Funktionalität prototypisch in der Software-Applikation veranschaulicht werden.

Anforderung 34:

Die Software-Applikation muss den Anwender (teil-)automatisiert bei der Bauteilkennzeichnung über ein Assistenzsystem unterstützen.

Zur Anbringung des ausgewählten Kennzeichnungsansatzes am Bauteil muss das in der Software-Applikation enthaltene Assistenzsystem den Benutzer teilautomatisiert im CAD-System assistieren und unterstützen. Diese Systemfunktionalität übernimmt die Auswahl der räumlichen Lage des ausgewählten Kennzeichnungsansatzes und modifiziert dementsprechend das Bauteilmodell. Dies wird durch die Implementierung der Methode zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung erreicht.

3.4.5 Zusammenfassung der Anforderungen

Das Anforderungsprofil setzt sich aus Anforderungen an die Methode zur Kennzeichnung, das Informationsmodell, die durchgängige Identifikation und die Implementierung des Gesamtkonzeptes zusammen. In Summe sind insgesamt 34 Anforderungen an die aufgeführten Bereiche identifiziert worden. In Tabelle 3-1 wird das erarbeitete Anforderungsprofil zusammengefasst dargestellt und durch die Art der jeweiligen Anforderung nach [98] ergänzt. Es wird zwischen *Festforderungen* (F) und *Wünschen* (W) differenziert. Anforderungen, die als *Festforderungen* deklariert sind, müssen im weiteren Verlauf der Konzeptionierung und Implementierung unter allen Umständen erfüllt werden. *Wünsche* sollen dem gegenüber bei der Konzeptionierung und Implementierung berücksichtigt werden, müssen jedoch nicht zwingend erfüllt werden. Das dargestellte Anforderungsprofil dient zum einen als Grundlage für die Konzeptentwicklung und die Implementierung und zum anderen zur späteren Verifikation der Gesamtlösung. Unter letzterer wird die Überprüfung der Übereinstimmung zwischen der entwickelten Lösung und dem zugehörigen Anforderungsprofil verstanden [34].

Tabelle 3-1: Anforderungsprofil an die bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Kennzeichnung und Identifikation in der Additiven Fertigung (fortlaufend)

Nr.	Art	Bezeichnung
Anforderungen an die Methode zur Kennzeichnung		
1	F	Die Methode zur Kennzeichnung muss bauteilindividuell und verfahrensspezifisch einen Kennzeichnungsansatz bestehend aus Kennzeichnungsträger und Identifikator definieren.

Tabelle 3-1: Anforderungsprofil an die bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Kennzeichnung und Identifikation in der Additiven Fertigung (fortlaufend)

Nr.	Art	Bezeichnung
2	F	Die Methode zur Kennzeichnung muss basierend auf dem Informationsmodell die technische Machbarkeit möglicher Kombinationen aus Kennzeichnungsträger und Identifikator nachweisen und bereitstellen.
3	F	Die Methode zur Kennzeichnung muss basierend auf der Bauteilgeometrie die Lösungsmenge in Frage kommender Kombinationen aus Kennzeichnungsträger und Identifikator vorgeschaltet minimieren.
4	F	Die Methode zur Kennzeichnung muss basierend auf dem Anforderungsprofil des Kunden die Lösungsmenge in Frage kommender Kombinationen aus Kennzeichnungsträger und Identifikator vorgeschaltet minimieren.
5	F	Die Methode zur Kennzeichnung muss optionale Anforderungen durch den Kunden berücksichtigen und verarbeiten.
6	F	Die Methode muss das prozessintegrierte Kennzeichnen der Bauteile im In-Prozess ermöglichen.
7	F	Die Methode zur Kennzeichnung muss die Festlegung der räumlichen Lage des Kennzeichnungsansatzes auf geometrischer und topologischer Basis lösen.
8	F	Die Methode zur Kennzeichnung muss das Bauteilgeometriemodell basierend auf Gestaltungsregeln durch den ausgewählten Kennzeichnungsansatz erweitern.
9	W	Die Methode zur Kennzeichnung soll das Modifizieren einer endlichen Menge an zu fertigenden Bauteilen sequentiell verarbeiten können.
Anforderungen an das Informationsmodell		
10	F	Das Informationsmodell muss modular aufgebaut und erweiterbar sein.

Tabelle 3-1: Anforderungsprofil an die bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Kennzeichnung und Identifikation in der Additiven Fertigung (fortlaufend)

Nr.	Art	Bezeichnung
11	F	Die Kerninformationen zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation in der Additiven Fertigung müssen im Kernmodell abgebildet werden.
12	F	Das Informationsmodell muss die zu fertigende Bauteilgeometrie enthalten.
13	F	Das Informationsmodell muss das Anforderungsprofil des Kunden abbilden.
14	F	Das Informationsmodell muss Attribute und Eigenschaften zur Bauteilprüfung abbilden, insbesondere gewählte verfahrensspezifische Prüfkriterien.
15	F	Das Informationsmodell muss Attribute und Eigenschaften der Bauteilorientierung und -positionierung abbilden, insbesondere die bauteilindividuelle modifizierte Rotation und Translation.
16	F	Das Informationsmodell muss den bauteilindividuellen und verfahrensspezifisch gewählten Kennzeichnungsansatz abbilden und über das Kernmodell integrieren.
17	F	Das Informationsmodell muss Informationen der etwaig anfallenden Stützstrukturgenerierung und Schichtdatenerstellung enthalten.
18	F	Das Informationsmodell muss Informationen aus dem In- und Post-Prozess über das Kernmodell integrieren und bereitstellen.
19	F	Das Informationsmodell muss die durchgängige Identifikation in der Additiven Fertigung gewährleisten.
Anforderungen an die durchgängige Identifikation		
20	F	Die durchgängige Identifikation muss anhand einer einmalig vergebenen und somit eindeutigen Identifikationsnummer erfolgen.
21	F	Die durchgängige Identifikation muss auf der Struktur des Informationsmodells aufbauen.

Tabelle 3-1: Anforderungsprofil an die bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Kennzeichnung und Identifikation in der Additiven Fertigung (fortlaufend)

Nr.	Art	Bezeichnung
22	F	Die durchgängige Identifikation muss die Bereitstellung der bauteilindividuellen Informationen bis zum Lebenszyklusende des Bauteils bereitstellen.
23	F	Die durchgängige Identifikation muss dem Bauteil die individuellen Informationen aus den durchlaufenen virtuellen Prozessschritten eindeutig zuordnen.
24	F	Die durchgängige Identifikation muss das physische Auslesen von Identifikationsarten im In- und Post-Prozess unterstützen und integrieren.
25	W	Die durchgängige Identifikation soll eine Vorgehensweise definieren, die es erlaubt, Wechselwirkungen von Bauteildefekten in der Nutzung und durchgeführten bauteilindividuellen Pre-Prozessschritten aufzuzeigen.
26	W	Die durchgängige Identifikation soll eine Vorgehensweise definieren, die es erlaubt, bauteilindividuelle Energiebedarfe zu ermitteln.
27	W	Die durchgängige Identifikation soll eine Vorgehensweise definieren, die es erlaubt, bauteilindividuelle Kosten zu ermitteln.
Anforderungen an die Implementierung		
28	F	Die Software-Applikation muss die durchgängige Identifikation von bauteilindividuellen Informationen in Form eines Nachverfolgungssystems bereitstellen.
29	F	Die Software-Applikation muss eine Datenschnittstelle für die domänenspezifische Anwendungssoftware bereitstellen.
30	F	Die Software-Applikation muss eine grafische Benutzungsoberfläche zur Interaktion und Navigation bereitstellen.
31	F	Die Software-Applikation muss die bauteilindividuellen Informationen aus dem Pre-Prozess über das Nachverfolgungssystem präsentieren.

Tabelle 3-1: Anforderungsprofil an die bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Kennzeichnung und Identifikation in der Additiven Fertigung (fortlaufend)

Nr.	Art	Bezeichnung
32	F	Die Software-Applikation muss die bauteilindividuellen Informationen aus dem In- und Post-Prozess sowie der Nutzung und dem Lebenszyklusende über das Nachverfolgungssystem präsentieren.
33	W	Die Software-Applikation soll die bauteilindividuellen Informationen zur Kostenzusammensetzung, zum Energiebedarf und Rückschlüssen auf ein Bauteilversagen visualisieren.
34	F	Die Software-Applikation muss den Anwender (teil-)automatisiert bei der Bauteilkennzeichnung über ein Assistenzsystem unterstützen.

Legende: F = Festforderung; W = Wunsch

4 Konzept zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung

In diesem Kapitel wird aufbauend auf den hergeleiteten und formulierten Anforderungen im vorherigen Kapitel das Konzept zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung entwickelt.

Das Konzept kombiniert eine Anpassung und Erweiterung der Prozesskette zur kundenindividuellen Additiven Fertigung samt erforderlichen Aktivitäten sowie das Vorgehen der Informationsmodellierung als Basis für die Entwicklung. Hier werden die Prozesse und deren Teilprozesse bzw. Aktivitäten modelliert sowie die erforderlichen und aus den Aktivitäten resultierenden bauteilindividuellen Informationen im Kontext der Informationsmodellierung formalisiert.

Im vorliegenden Kapitel werden für ein einheitliches Verständnis zuerst relevante Begrifflichkeiten definiert. Im Anschluss wird die gewählte Vorgehensweise zur Entwicklung des Konzeptes vorgestellt. Basierend auf der Darstellung des Gesamtkonzeptes werden die notwendigen Konzeptelemente in Konzeptbausteinen zusammengefasst und im Zusammenhang mit dem Gesamtkonzept vorgestellt. Diese Vorstellung umfasst die Entwicklung und formale Modellierung sowie Beschreibung des neuen Prozessschrittes der Bauteilkennzeichnung. Ferner werden aus der dargestellten Prozesskette die benötigten Partialmodelle und die vorliegenden Verknüpfungen zwischen den Modellen definiert. Hierauf aufbauend wird das Informationsmodell zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation entwickelt und detailliert beschrieben. Basierend auf diesen Entwicklungen wird ein Konzept zur durchgängigen Nachverfolgung und Identifikation von kundenindividuellen Fertigungsaufträgen vorgeschlagen. Die entwickelten Konzeptbausteine werden zusammen mit bereits bestehenden Lösungsansätzen (siehe Kapitel 2.6) zum Gesamtkonzept aggregiert und bilden die Grundlage für die Implementierung (siehe Kapitel 5).

4.1 Definition der Begrifflichkeiten

Für die vorliegende Dissertation sind insbesondere die Begrifflichkeiten Identifikationssystem, Identifikation und Identifikator sowie Kennzeichnung und Markierung von Relevanz. Diese werden nachfolgend gemäß dem Stand der Wissenschaft definiert. Aufbauend auf diesen Beschreibungen werden die für die vorliegende Dissertation gültigen Definitionen erarbeitet.

Identifikationssystem

„Der Begriff Identifikationssystem beschreibt ein technisches System, das die automatisierte Erkennung von Objekten ermöglicht, die mit Informationsträgern gekennzeichnet sind. Ein Minimalsystem nach dieser Definition besteht aus einem Informationsträger, einer Leseeinrichtung und einer Auswerteeinheit.“ [253]

Unter dem Informationsträger ist das zu identifizierende Objekt samt einem charakteristischen Merkmal, dem Identifikator, zu verstehen. Das Identifikationssystem benötigt neben der Leseeinrichtung zudem eine Auswerteeinheit zur Steuerung der Identifikation und Verarbeitung der erfassten Daten. [119]

Identifikation

Für den Terminus Identifikation bestehen je nach Forschungsgebiet und Betrachtungsweise differente Definitionen und Verständnisse. Die wichtigsten werden hier aufgeführt, um abschließend eine gültige Definition für die vorliegende Dissertation abzuleiten.

HELMUS definiert die Identifizierung im Kontext der Logistik derart:

„Eine Identifizierung ist der Vorgang, der zum eindeutigen Erkennen einer Person oder eines Objektes dient. Identifizierung erfolgt anhand kennzeichnender Merkmale oder mit Hilfe eines Identifikators und beruht auf dem Identitätssatz.“ [125]

Nach BUCHMANN beschreibt die Identifikation im Zusammenhang mit der Kryptografie als:

„Überprüfung einer Zugangsberechtigung, die an eine bestimmte Identität gebunden ist. Verfahren, die Identifikation ermöglichen, nennt man Identifikationsprotokolle. In einem Verifikationsprotokoll verifiziert der Beweiser dem Verifizierer, dass der Verifizierer gerade mit dem Beweiser kommuniziert hat bzw. kommuniziert. Identifikation muss also in Realzeit erfolgen.“ [52]

HARRIS beschreibt, dass eine Identifikation eine Methode ist, welche sicherstellt, dass ein Subjekt die Entität ist, die es behauptet zu sein:

„Identification describes a method of ensuring that a subject (user, program, or process) is the entity it claims to be.“ [121]

HÜHNLEIN definiert die Identifizierung bzw. Identifikation wie folgt:

„Identifizierung bezeichnet den Vorgang unter Verwendung von behaupteten oder beobachteten Attributen zu bestimmen, um welche Entität es sich handelt.“ [130]

Nach DIN 6763 wird unter Identifikation bzw. Identifizieren folgendes verstanden:

„Identifizieren ist das eindeutige und unverwechselbare Erkennen eines Gegenstandes anhand von Merkmalen (Identifizierungsmerkmalen) mit der für den jeweiligen Zweck festgelegten Genauigkeit.“ [69]

Vereinfacht lässt sich Identifizieren bzw. die Identifikation nach GÜNTHER [119] derart definieren:

„Beim Identifizieren wird das charakteristische Merkmal eines Objektes erkannt und einer bestimmten Klasse zugeordnet.“

Für die vorliegende Dissertation wird im Folgenden die nachstehende Definition für Identifikation bzw. Identifizierung entwickelt und verwendet, diese bildet eine Kumulierung der oben genannten Definitionen:

„Die Identifikation bzw. Identifizierung von Objekten ist die Bestimmung der Identität jenes Objektes anhand kennzeichnender Merkmale in Form eines Identifikators oder inhärenter Objektattribute.“

Identifikator, Markierung und Kennzeichnung

Nach VDI 4416 ist ein Identifikator (kurz: ID) bzw. eine Kennung folgendermaßen definiert:

„Ein Identifikator ist ein künstlich zugewiesenes Merkmal zur eindeutigen Identifizierung eines Objekts.“ [243]

Gemäß DUDEN werden die Begriffe Markierung und Kennzeichnung gleichgesetzt und können synonym verwendet werden [91]. Unter Markierung und Kennzeichnung wird das Ergänzen eines Objektes um ein spezielles Merkmal bzw. eines speziellen Identifikators verstanden [125]. In der Literatur wird nicht stringent zwischen Markierung und Kennzeichnung differenziert. Für die vorliegende Aufgabe

wird demnach eine eigene Definition zur Unterscheidung der beiden Begrifflichkeiten definiert:

„Eine Markierung erlaubt es, ein Objekt lediglich kategorisch zuzuordnen. Eine Kennzeichnung stellt eine Spezialisierung der Markierung dar, sie erhält einen größeren Informationsgehalt. Hierdurch erlaubt eine Kennzeichnung durch die Verwendung eines Identifikators eine eindeutige Objektidentifikation.“

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass für die Identifikation von Bauteilen in der Additiven Fertigung ein Identifikationssystem notwendig ist. Dieses Identifikationssystem besteht aus dem Bauteil selbst, einem angebrachten Identifikator, einer Leseeinheit sowie einer Auswerteeinheit [26; 253]. Zur Anbringung des Identifikators wird ein Kennzeichnungsträger benötigt. Der Kennzeichnungsträger bildet die geometrische Grundlage zur Anbringung des Identifikators. Beispielsweise ermöglicht ein oberflächenintegrierter Kennzeichnungsträger das direkte Kennzeichnen durch Materialintrusion der Bauteiloberfläche durch einen Identifikator. Abbildung 4-1 veranschaulicht die Bestandteile des Identifikationssystems wie es in der vorliegenden Dissertation zu verstehen ist.

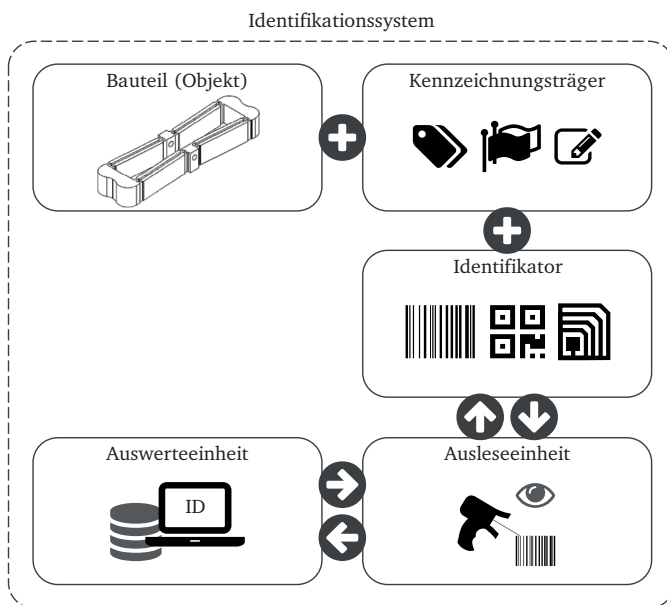


Abbildung 4-1: Bestandteile Identifikationssystem, aufbauend auf [119]

4.2 Konzeptionelle Vorgehensweise

Das Hauptaugenmerk des Konzeptes liegt auf der durchgängigen Identifikation von kundenindividuellen Bauteilen über die gesamte Prozesskette hinweg. Hierbei sollen die beteiligten Prozessschritte basierend auf methoden- und verfahrensbedingtem Wissen agieren. Ferner gilt es, einen Prozessschritt zur wissensbasierten Kennzeichnung von Bauteilen in die Prozesskette zu integrieren. Hierdurch wird die durchgängige Identifikation und Nachverfolgung der Bauteile über die digitale Verarbeitung bis in die realen Prozessschritte wie In- und Post-Prozess gewährleistet.

Die konzeptionelle Vorgehensweise besteht im Wesentlichen aus zwei Ansätzen. Zum einen bildet der prozess- und aktivitätsorientierte Ansatz einen Bestandteil der Vorgehensweise. Dieser beschreibt den Ablauf der zu verarbeitenden Informationen vom Eingang der Kundeninformationen, in Form von zu fertigender Bauteilgeometrie und dem Anforderungsprofil, bis zum gefertigten Bauteil und dessen Auslieferung an den Kunden. Das konzeptionelle Vorgehen wird durch den Ansatz der Vorgehensweise bei der Informationsmodellierung komplettiert. Die in den einzelnen Prozessschritten und Aktivitäten identifizierten und erzeugten Informationen müssen im Sinne der Informationsmodellierung für eine rechnerinterne Weiterverarbeitung formalisiert werden [250]. Dies ermöglicht die Herangehensweise der Informationsmodellierung.

Ein Prozess besteht aus einer Folge von Aktivitäten, welche aus einer Reihe von Eingangsgrößen bestimmte Ausgangsgrößen erzeugen [55; 207]. Jene Eingangs- und Ausgangsgrößen, auch als Input und Output bezeichnet, werden im Zusammenhang eines Prozesses auch als Zustände beschrieben [101; 124]. Dabei ist ein Prozess die inhaltlich abgeschlossene sowie zeitliche Folge von Aktivitäten, welche der Erreichung eines vordefinierten Ziels dienen [38]. Der Zusammenschluss von mehreren Prozessen führt zu einer Prozesskette. Nach ANDERL wird unter einer Prozesskette die formale, hierarchisch strukturierte Zusammenfassung von Informationsverarbeitungsprozessen, die einem gemeinsamen Prozessziel dienen, verstanden [17]. Zur Unterstützung durch ein formales Modell müssen die relevanten Informationen, Eingangs- und Ausgangsgrößen sowie Steuerdaten und Mittel für jeden Prozessschritt bzw. jede Aktivität formalisiert werden. Für die Konzeptentwicklung eignen sich verschiedene Modellierungsmethoden für Prozesse, beispielsweise die Modellierung der *Ereignisgesteuerten Prozesskette* (EPK) und *erweiterten Ereignisgesteuerten Prozesskette* (eEPK) oder die *Business Process Modeling Notation* (BPMN) [17]. Als Grundlage für die Formalisierung der relevanten Informationen wird im Folgenden u. a. die graphisch orientierte Systementwurfs-

und Beschreibungsmethode *Structured Analysis and Design Technique* (SADT) verwendet [199]. Diese Methode erlaubt es, funktionale Abläufe in einem System darzustellen. Dabei werden Eingabedaten (Input) zur Ausführung der jeweiligen Aktivität sowie Ausgabedaten (Output), welche durch die Aktivität erzeugt wurden, definiert. Steuerdaten (Control) legen die Bedingungen und Regeln zur Durchführung und Steuerung der Aktivität fest [154]. Komplettiert wird die Modellierungsmethode durch die Angabe von Ressourcen (Mechanism), welche für die Aktivität benötigt werden [154]. Zur übersichtlichen Darstellung von Prozessen bzw. Prozessketten findet in der SADT eine hierarchische Gliederung im Sinne der Top-Down-Vorgehensweise statt [118]. Die hierdurch modellierten Prozesse dienen als Grundlage zur anschließenden Formalisierung der Informationen. Neben der SADT Methode zur Modellierung von Prozessen werden in der Konzeptentwicklung ebenfalls die Werkzeuge der *Unified Modeling Language* (UML) verwendet. Insbesondere bietet sich das Aktivitätsdiagramm zur Modellierung von Prozessen und Aktivitäten an. Dieses beschreibt den Ablauf und wird durch verschiedene Knoten, welche durch Objekt- und Kontrollflüsse miteinander verbunden sind, definiert [181]. Basierend auf den derart modellierten Prozessen und Prozessketten kann im weiteren Verlauf der Konzeptentwicklung der Ansatz der Informationsmodellierung durchgeführt werden. Nach ASHENHURST besteht der Ansatz der Informationsmodellierung aus diesen drei Schritten: der *Identifikation* der Elemente, der *Klassifikation* und *Abstraktion* der Elemente sowie der *Formalisierung* der Elemente [27].

Ausgehend vom definierten Gesamtprozess der bauteilindividuellen und verfahrens-spezifischen Kennzeichnung und Identifikation und dessen formaler Modellierung lassen sich für die vorliegende Aufgabe folgende Teilprozesse identifizieren:

- Bauteilprüfung auf prinzipielle Fertigbarkeit und Konsistenz des Bauteilmodells
- Bauteilorientierung basierend auf methoden- und verfahrensbedingtem Wissen
- Bauteilkennzeichnung basierend auf Anforderungsprofil und Bauteilgeometrie
- Bauteilpositionierung des gekennzeichneten Bauteils basierend auf methoden- und verfahrensbedingtem Wissen
- Stützstruktur- und Schichtdatengenerierung des virtuellen Bauraums auf methoden- und verfahrensbedingtem Wissen
- Durchführung In-Prozess basierend auf Anforderungsprofil

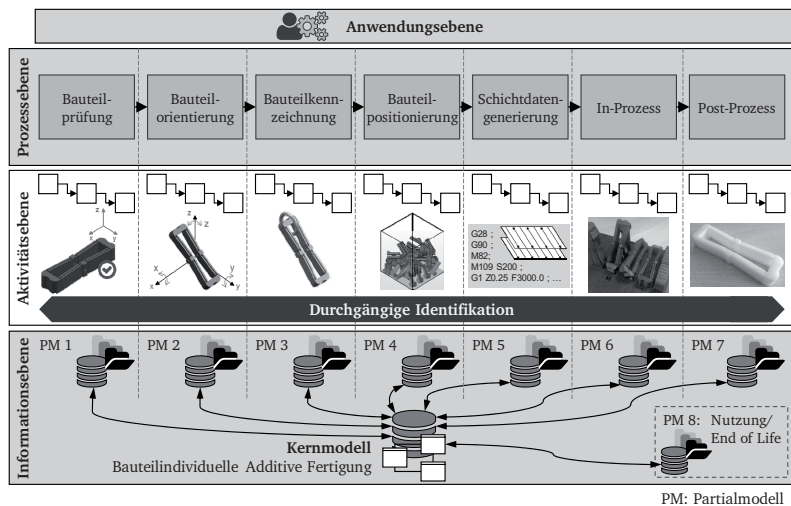
- Durchführung Post-Prozess basierend auf Anforderungsprofil

Von besonderem Interesse in der vorliegenden Dissertation ist der Teilprozess der Bauteilkennzeichnung. Dieser stellt eine Neuentwicklung dar und führt somit zur Erweiterung der Prozesskette zur bauteilindividuellen Additiven Fertigung. Die Herausforderung liegt hier zum einen in der Auswahl der optimalen Kombination aus Kennzeichnungsträger und Identifikatorart basierend auf der Analyse des Anforderungsprofils und der Bauteilgeometrie. Zum anderen stellt die Auswahl der räumlichen Lage der Kennzeichnung am orientierten Bauteil eine Herausforderung dar. Um diesen beiden Herausforderungen entgegenzutreten, werden Vorgehensweisen entwickelt, die basierend auf den Anforderungsprofilen und Bauteilgeometrien Abfragen durchlaufen und durch eine entwickelte Logik ein eindeutiges bauteilindividuelles und verfahrensspezifisches Ergebnis erzielen.

Durch die Entwicklung und Modellierung des neuen Teilprozesses der Bauteilkennzeichnung sowie die Beschreibung der relevanten Informationen aus den weiteren beteiligten Prozessschritten können jene Informationen strukturiert und formalisiert werden. Das Ergebnis der Formalisierung ist das Informationsmodell zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung. Das Informationsmodell bildet eine rechnerinterne Repräsentation der Informationen, welche es im Zuge der Implementierung (siehe Kapitel 5) in eine Rechner interpretierbare Präsentation zu überführen gilt. Die Modellierung und Abbildung der Informationen und der vorliegenden Beziehungen und Abhängigkeiten wird hier ebenfalls mit UML durchgeführt. Basierend auf dem Gesamtprozess sowie dem entwickelten Informationsmodell wird eine durchgängige Identifikation gewährleistet.

4.3 Konzeptstruktur

Die gewählte konzeptionelle Vorgehensweise führt zur Bildung eines Vier-Ebenen-Modells, welches die Konzeptstruktur repräsentiert, siehe Abbildung 4-2.



PM: Partialmodell

Abbildung 4-2: Konzeptstruktur – Vier-Ebenen-Modell

Das Vier-Ebenen-Modell beinhaltet eine übergeordnete **Prozessebene**. Hier ist der Gesamtprozess zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung abgebildet. Von der Bauteilprüfung, über die neuentwickelte Bauteilkennzeichnung, bis zur Durchführung des In- und Post-Prozesses. Der neue Teilprozess Bauteilkennzeichnung wird zwischen die Bauteilorientierung und der -positionierung integriert. Hierdurch wird gewährleistet, dass die Bauteile zuerst basierend auf Methoden- und Fertigungswissen qualitätsgerecht orientiert werden und darauf aufbauend die optimale Art und Lage der Kennzeichnung ausgewählt werden kann. Sind demnach alle Bauteile orientiert und gekennzeichnet, werden sie gemeinsam im virtuellen Bauraum positioniert. Würde die Kennzeichnung nach dem Positionieren stattfinden, könnte es zu Kollisionen zwischen Kennzeichnungsträgern kommen. Da die ungekennzeichneten Bauteile mit einer möglichst hohen Packdichte positioniert werden und somit evtl. Raum für die Kennzeichnung zwischen den Bauteilen fehlen würde. Jeder der erforderlichen Teilprozesse lässt sich in der **Aktivitätsebene** in einzelne Aktivitäten bzw. Funktionen unterteilen. Um den jeweiligen Prozess zu durchlaufen, werden demnach definierte Aktivitäten gestartet, hierdurch werden die prozessschrittspezifischen Ausgabedaten bzw. Outputs erzeugt. Die durchgängige Identifikation wird ebenfalls als Funktion bzw. Aktivität deklariert. Das Fundament des Vier-Ebenen-Modells bildet die **Informationsebene**. Für eine metho-

den- und verfahrensbasierte Durchführung in den Prozessschritten werden die Aktivitätselemente in ein Informationsmodell bestehend aus Kern- und Partialmodellen überführt. Das Kernmodell bildet die essentiellen Informationen und Abhängigkeiten zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation ab. Hierzu zählen die Bauteilgeometrie und das vom Kunden gestellte Anforderungsprofil sowie eine vergebene eindeutige Identifikationsnummer. Partialmodelle sind für jede Phase des Gesamtprozesses vorgesehen. Neben den abgeleiteten Informationen und Beziehungen aus den Prozessschritten und deren Aktivitäten werden ebenfalls zur Erreichung eines ganzheitlichen Ansatzes Informationen und Beziehungen aus den Phasen *Nutzung* und *Lebenszyklusende* berücksichtigt. Hierdurch kann der gesamte Lebenszyklus von additiv gefertigten Bauteilen beschrieben werden. Der Anwender interagiert mit dem Gesamtsystem über die **Anwendungsebene**. Diese umfasst zum einen die Eingabe von Bauteilgeometrie und Anforderungsprofil und ermöglicht zum anderen die Nachverfolgung von kundenindividuellen Aufträgen. Ferner stellt die Software-Applikation das rechnerinterne Werkzeug zur Bauteilkennzeichnung bereit. Die Eingabe der Kundeninformationen initiiert sogleich auch den Gesamtprozess.

Das nachfolgend entwickelte und beschriebene Konzept umfasst im Kern zwei Konzeptbausteine und die darauf aufbauende Bereitstellung einer durchgängigen Identifikation. Der erste Konzeptbaustein beinhaltet die Entwicklung des Prozessschrittes und deren hierarchisch untergegliederten Aktivitäten zur Bauteilkennzeichnung in Form einer Methode. Der zweite Konzeptbaustein umfasst die Entwicklung des fundamentalen Informationsmodells für die bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Kennzeichnung und Identifikation. Basierend auf diesen Konzeptbausteinen wird eine durchgängige Identifikation und Nachverfolgung von kundenindividuellen additiv zu fertigenden Bauteilen bereitgestellt. Die beiden Konzeptbausteine werden in den folgenden Kapiteln detailliert beschrieben. Abschließend wird auf die Bereitstellung der durchgängigen Identifikation eingegangen. Die Umsetzung und Funktionsweise der in der Anwendungsebene befindlichen Software-Applikation erfolgt in der prototypischen Implementierung in Kapitel 5. Hier werden auch die bereits bestehenden Lösungsansätze und Anwendungssysteme für die restlichen Prozessschritte samt deren Aktivitäten in den Gesamtprozess integriert, vergleiche Kapitel 2.6.

4.4 Methode zur Kennzeichnung von additiv zu fertigenden Bauteilen

In diesem Abschnitt wird eine Methode zur Kennzeichnung von additiv zu fertigenden Bauteilen als Kern des Gesamtkonzeptes entwickelt. Eine Methode ist nach PÜTTER wie folgt definiert:

„Eine Methode ist ein planmäßiges, systematisches Verfahren, welches zur Bearbeitung einer Aufgabe dient.“ [191]

Zur Bearbeitung einer Aufgabe kommen zwei Herangehensweisen in Frage, der Top-down- und der Bottom-up-Ansatz [35]. Beim Bottom-up-Vorgehen werden einzelne Elemente zu einem Ganzen aggregiert. Demgegenüber wird beim Top-down-Ansatz das bestehende Problem schrittweise zerlegt, bis ein ausreichender Detaillierungsgrad erreicht ist. Durch letzteren Ansatz wird gewährleistet, dass global wirkende Parameter in den Prozessen auf die einzelnen Aktivitäten vererbt werden können. Änderungen im Prozessschritt *Bauteilkennzeichnung* können so direkt in der Aktivitätsebene als Randbedingungen zur Verfügung gestellt werden. Ferner ermöglicht das Top-down-Vorgehen das sukzessive Erarbeiten von erforderlichen Elementen, was die Formalisierung der Informationen und Elemente gemäß der Informationsmodellierung erleichtert. Daher wird hier der Top-down-Ansatz zur Entwicklung der Methode gewählt.

Wie bereits im Stand der Technik herausgearbeitet, erfordert die Kennzeichnung von Bauteilen einen Identifikator und einen Kennzeichnungsträger, siehe auch Abbildung 4-1. Der gewählte Ansatz, dass die Kennzeichnung aus einer bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kombination aus Kennzeichnungsträger und Identifikator besteht, ist als gänzlich neu einzustufen. Er ermöglicht je nach Bauteilgeometrie und vom Kunden gewähltem Anforderungsprofil einen für den vorliegenden Anwendungsfall optimalen Kennzeichnungsansatz. Der Prozessschritt *Bauteil kennzeichnen*, siehe auch Abbildung 4-2, besteht aus zwei wesentlichen Aktivitäten bzw. Funktionen in der Aktivitätsebene. In einem ersten Schritt wird die bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Kennzeichnungsträger-Identifikator-Kombination (K-I-Kombination) ausgewählt. Anschließend wird für diese Kombination die räumliche Lage am Bauteil ausgewählt und schließlich die K-I-Kombination am Bauteil angebracht. Abbildung 4-3 zeigt den modellierten Prozess zur Bauteilkennzeichnung in einem SADT-Diagramm, diese Art der Modellierung eignet sich ideal zur Darstellung der gewählten Top-down-Vorgehensweise. Der Teilprozess bzw. die Aktivität A0 *Bauteil kennzeichnen* stellt die oberste Hie-

rarchiestufe dar. Alle Aktivitäten sind durch eine fortlaufende Indizierung hierarchisch gegliedert, wobei die Eingangs-, Ausgangs-, Steuer- und Ressourcen-Informationen jeweils von der übergeordneten Hierarchieebene an die darunter folgende Hierarchieebene weitergeleitet bzw. vererbt werden [17; 154]. In denen darunter gegliederten Aktivitäten werden Detaillierungen aufgezeigt. Im vorliegenden Fall bilden die Aktivität *K-I-Kombination auswählen* die untergeordnete Aktivität A1 und die Aktivität *K-I-Kombination an Bauteil anbringen* die hierarchisch untergeordnete Aktivität A2. Beide Aktivitäten befinden sich auf der identischen Hierarchieebene.

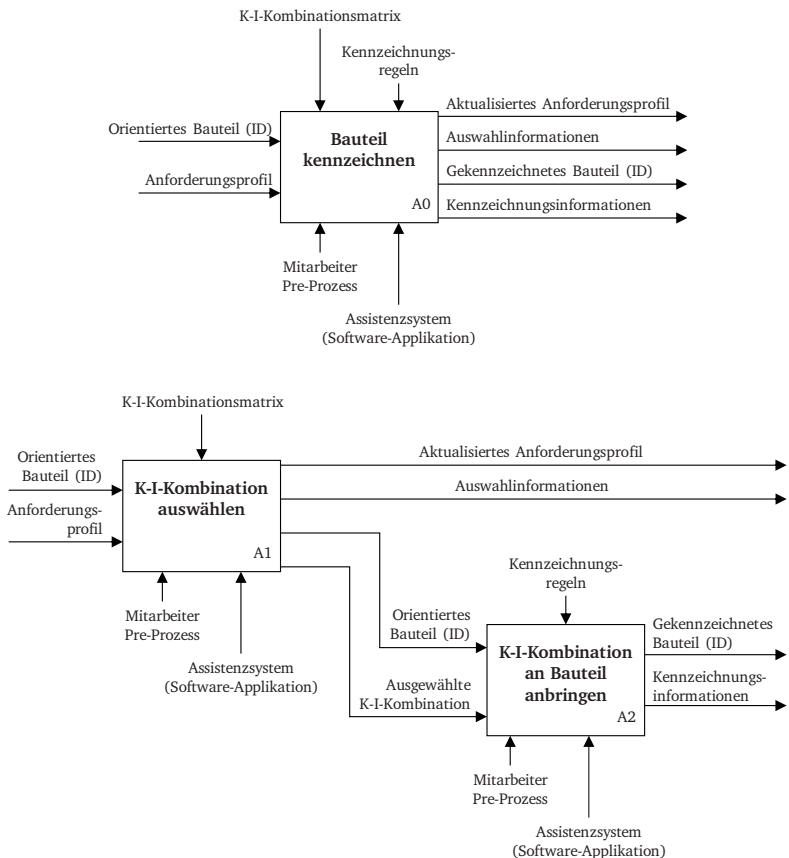


Abbildung 4-3: Prozessmodell für Bauteilkennzeichnung in SADT

Die zur Bauteilkennzeichnung erforderlichen Eingangsgrößen bilden das orientierte Bauteil samt vergebener Identifikationsnummer (ID) und das vom Kunden aufgestellte Anforderungsprofil. Das orientierte Bauteil ist Ergebnis des Teilprozesses *Bauteilorientierung*, siehe Abbildung 4-2. Das Anforderungsprofil kann im Wesentlichen drei Kundentypen repräsentieren:

- **Kundentyp 1:** Der Kunde benötigt selbst keine Kennzeichnung des Bauteils. Hier komplettiert das produzierende Unternehmen das Anforderungsprofil hinsichtlich der Forderungen an die Kennzeichnung.
- **Kundentyp 2:** Der Kunde benötigt eine Kennzeichnung am Bauteil, stellt an die Art dieser Kennzeichnung und die Kennzeichnungsstelle am Bauteil jedoch keine Anforderungen.
- **Kundentyp 3 (hier nicht explizit berücksichtigt):** Der Kunde benötigt eine Kennzeichnung am Bauteil und gibt eine Stelle zum Kennzeichnen und/oder die Kennzeichnungsart vor. Er stellt dementsprechend Anforderungen an die Art dieser Kennzeichnung und/oder an die Stelle dieser am Bauteil.

Die Methode bedient diese drei Kundentypen gleichermaßen. Im ersten Fall liefert die Methode eine Kennzeichnung, welche während des Prozesses durchgängig ist und vor dem Versand an den Kunden entfernt wird. Der zweite Fall erfordert ebenfalls den vollen Umfang der Methode zur Kennzeichnung, jedoch über den Post-Prozess hinaus, da auch der Kunde die Kennzeichnung benötigt. Im dritten Szenario kann der Kunde eine Stelle bzw. Fläche an der Bauteilgeometrie vorgeben, welche zu kennzeichnen ist. Die Methode muss neben der gesamten Auswahl insbesondere die vom Kunden gewünschte Fläche hinsichtlich der Machbarkeit für eine Kennzeichnung prüfen. Alternativ kann der Kunde im dritten Fall auch die Art der Kennzeichnung definieren und die Stelle am Bauteil freilassen. Hier muss die Machbarkeit der geforderten Kennzeichnungsart geprüft werden. Ferner ist eine Kombination der Anforderungen im dritten Fall möglich. Die entwickelte Methode eignet sich insbesondere für Kundentyp 1 und für Kundentyp 2, da hier der volle Funktionsumfang benötigt und in Anspruch genommen wird. Im Folgenden werden die Erläuterungen primär für diese beiden Kundentypen bzw. den zugehörigen Anforderungsprofilen durchgeführt. Auf Abweichungen der Vorgehensweise für den Kundentyp 3 wird am Ende von Abschnitt 4.4.2.3 hingewiesen.

Unter Einfluss der Steuergrößen *K-I-Kombinationsmatrix* und *Kennzeichnungsregeln* werden die Eingangsgrößen *orientiertes Bauteil* und *Anforderungsprofil* zu verschiedenen Ausgangsgrößen transformiert, siehe Abbildung 4-2. Das primäre Ergebnis des Teilprozesses *Bauteil kennzeichnen* ist das gekennzeichnete Bauteil

selbst. Neben diesem werden Informationen zur Kennzeichnung und zur gewählten Auswahl aggregiert. Ferner wird das Anforderungsprofil des Kunden aktualisiert. Diese Transformation und Erzeugung von Informationen werden mithilfe der Ressourcen *Mitarbeiter im Pre-Prozess* und des *Assistenzsystems* zur Interaktion erzeugt.

In den nächsten Abschnitten wird die zweistufige Methode zum bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnen der Bauteile detailliert vorgestellt.

4.4.1 Auswahl Kennzeichnungsträger und Identifikatorart

Die erste Auswahlstufe der Methode umfasst das Auswählen des bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnungsansatzes bestehend aus der Kombination aus Kennzeichnungsträger und Identifikatorart. Der Grund für die Differenzierung zwischen Kennzeichnungsträger und Identifikator liegt darin begründet, dass sich nicht für jeden Anwendungsfall ein bestimmter Träger oder Identifikator eignet. Außerdem wird dem Kunden so die Möglichkeit eröffnet, die für ihn optimale Kombination zu definieren. Ferner existiert keine Kennzeichnungslösung, die alle Anwendungsfälle abbildet. Beispielsweise existieren Kennzeichnungsträger, die nur für die unternehmensinterne Fertigung bestimmt sind, demgegenüber stehen Möglichkeiten zur lebenslangen Anbringung. Alle relevanten Anwendungsfälle können durch die Kombinationen von Kennzeichnungsträger und Identifikator bedient werden. Gemäß Abbildung 4-3 sind für die Aktivität *A1 K-I-Kombination auswählen* das orientierte Bauteil sowie das Anforderungsprofil erforderlich. Zur Definition und Entwicklung aller notwendigen Elemente in dieser Aktivität wird diese in verschiedenen Arbeitsschritten beschrieben und modelliert.

Abbildung 4-4 zeigt die Detaillierung von Aktivität A1 in einem UML Aktivitätsdiagramm. Diese Modellierungsmethode ist in diesem Fall geeigneter als die SADT Methode, da in UML durch die Verwendung von Kontrollknoten verschiedene Kontrollflüsse basierend auf gestellten Bedingungen modelliert werden können.

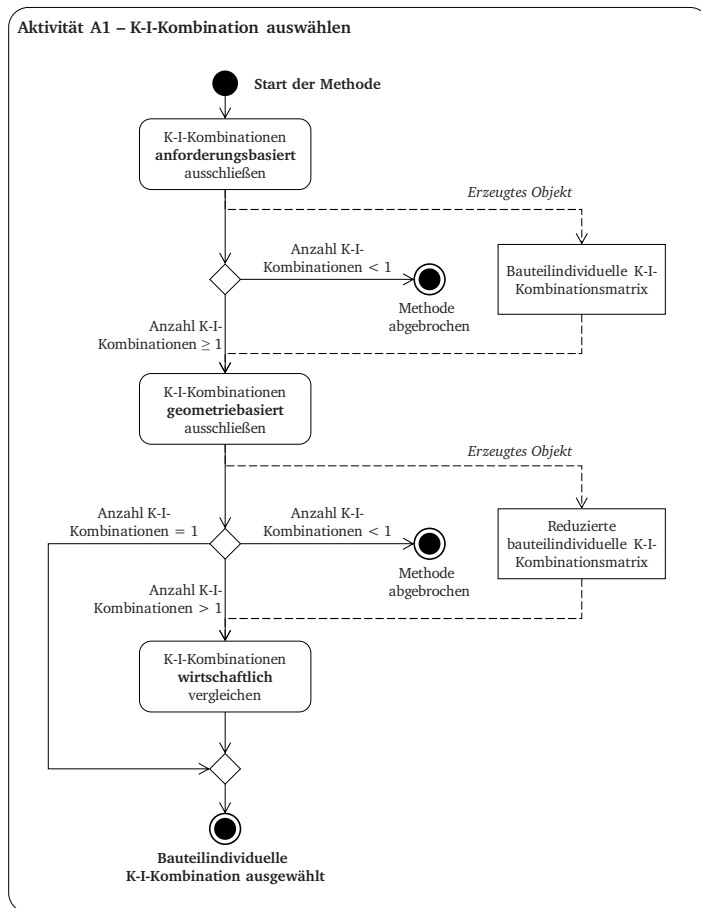


Abbildung 4-4: Ablauf der Aktivität A1 – K-I-Kombination auswählen

Die Auswahl einer K-I-Kombination besteht, je nach vorliegendem Anforderungsprofil und Bauteilgeometrie, aus bis zu drei Arbeitsschritten. Dabei basiert die Auswahl auf dem Prinzip des Ausschlussverfahrens bzw. der Eliminierung von nicht umsetzbaren Lösungen. Für die Arbeitsschritte *anforderungsbasierter* und *geometriebasierter Ausschluss von K-I-Kombinationen* bildet die universale K-I-Kombinationsmatrix die Grundlage. Diese ist als Steuergröße für die durchzuführende Aktivität von essentieller Bedeutung, siehe auch Abbildung 4-3. Diese erforderliche Matrix wird im nachfolgenden Kapitel detailliert beschrieben.

Nachdem die Methode gestartet ist, werden basierend auf dem Anforderungsprofil nicht umsetzbare Kombinationen aus der universalen K-I-Kombinationsmatrix für den speziellen Anforderungsfall ausgeschlossen. Die universale K-I-Kombinationsmatrix wird hierdurch zur bauteilindividuellen K-I-Kombinationsmatrix. Das Anforderungsprofil enthält dabei folgende Anforderungen durch den Kunden:

- Anforderung an Lebensdauer der Kennzeichnung: lebenslanges Identifizieren erforderlich
- Anforderung an Lesbarkeit des Identifikators: menschenlesbar, maschinenlesbar oder menschen- und maschinenlesbar
- Anforderung an additives Fertigungsverfahren (AFV): Strangablegeverfahren, Kunststoff-Laser-Sintern oder Laser-Strahlschmelzen
- Anforderung an Nachbearbeitungsverfahren (NBV): mechanisches Stützenentfernen, chemisches Stützenentfernen, Druckluftreinigen, Strahlen, Gleitschleifen, Infiltrieren, Lackieren, Glühen oder Härten (siehe auch Tabelle 2-1)

In einem weiteren Schritt werden nicht umsetzbare Lösungen aus der bauteilindividuellen K-I-Kombinationsmatrix basierend auf der Bauteilgeometrie eliminiert. Die Prüfung, ob ein Kennzeichnungsträger an einem Bauteil angebracht werden kann, beinhaltet dabei folgende, noch zu detaillierende, Abfragen, siehe Kapitel 4.4.1.2:

- Ebene Fläche mit bestimmter Größe vorhanden?
- Mindestwandstärke einer Wand mit einer Fläche von bestimmter Größe vorhanden?
- Bauteilhüllkörper kleiner, gleich vordefinierter Maximalgröße?
- Volumendurchbruch mit ausreichendem Querschnitt in Bauteilgeometrie vorhanden?

Durch diese Abfrage der Bauteilgeometrie und/oder -topologie werden weitere K-I-Kombinationen eliminiert und es entsteht die reduzierte bauteilindividuelle K-I-Kombinationsmatrix.

Enthält die reduzierte bauteilindividuelle K-I-Kombinationsmatrix nach dem anforderungs- und geometriebedingten Ausschluss von K-I-Kombinationen mehr als eine umsetzbare Kombination wird ein wirtschaftlicher Vergleich durchgeführt. Durch eine definierte Funktion werden den möglichen K-I-Kombinationen wirtschaftliche Wertigkeiten vergeben. Diese lassen sich relativ zueinander vergleichen und haben zum Ziel, die aufwandsgünstigste Kombination auszuwählen.

Neben der Entwicklung der K-I-Kombinationsmatrix werden in den nachfolgenden Abschnitten die drei skizzierten Arbeitsschritte aus Abbildung 4-4 hinsichtlich ihres Ablaufes und der hinterlegten Logik erläutert.

4.4.1.1 Entwicklung universale K-I-Kombinationsmatrix

Die Basis zur Auswahl der bauteilindividuellen K-I-Kombination bildet die universale K-I-Kombinationsmatrix. In dieser wird die technische Umsetzbarkeit der Kombinationsmöglichkeiten von Kennzeichnungsträger und Identifikatorart basierend auf dem kundenindividuellen Anforderungsprofil und der Bauteilgeometrie dargestellt. Dies bildet wiederum die Grundlage für das Ausschließen von nicht umsetzbaren Lösungen für den jeweils vorliegenden Anwendungsfall. Tabelle 4-1 zeigt den grundlegenden Ansatz der universalen K-I-Kombinationsmatrix. In der linken Spalte werden die möglichen Kombinationen aus Kennzeichnungsträger und Identifikatorart eingetragen. Die weiteren Spalten der Matrix beinhalten die Attribute und deren Werte. In der zweiten Zeile der Kombinationsmatrix werden Attribute aus dem kundenindividuellen Anforderungsprofil, der Bauteilgeometrie und dem Aufwand in Bezug einer Kombination aus Kennzeichnungsträger und Identifikatorart beschrieben. Somit bildet die K-I-Kombinationsmatrix eine Funktion von Attributen (A_k) und Kombinationen ($K_i I_j$) ab, wobei die Matrixeinträge (p_{kij}) in Form der Attributwerte wie folgt deklariert werden, siehe Tabelle 4-1:

$$F(A_k, K_i I_j), \quad (k, ij) \rightarrow p_{kij}$$

mit $i = 1, \dots, m$ und $j = 1, \dots, n$ und $k = 1, \dots, q$

Die Kombinationen aus Kennzeichnungsträger (K) und Identifikatorart (I) werden mit folgender Indizierung gebildet:

$$K_i I_j \text{ mit } i = 1, \dots, m \text{ und } j = 1, \dots, n$$

Diese Wahl der Kombination beschreibt eine $m \times n$ -Matrix, wobei die Reihenfolge bzw. die Anordnung von K_i und I_j vertauscht werden können, d. h. $K_i I_j = I_j K_i$. Somit ergeben sich beispielsweise bei der Verwendung von fünf Kennzeichnungsträgern mit fünf Identifikatorarten in Summe 25 mögliche K-I-Kombinationen.

Diesen theoretisch möglichen K-I-Kombinationen werden Attribute gegenübergestellt, denen quantifizierbare Werte zugeordnet sind. Die Attribute leiten sich aus dem kundenindividuellen Anforderungsprofil und der Bauteilgeometrie ab und werden mit folgender Indizierung beschrieben:

$$A_k \text{ mit } k = 1, \dots, q$$

Die in Tabelle 4-1 eingetragenen Attribute A_k repräsentieren folgende Informationen:

Attribute aus kundenindividuellem Anforderungsprofil (mögliche Attributwerte):

A1 : Lebenslanges Auslesen (ja/nein)

A2 : Maschinenlesbarkeit (ja/nein)

A3 : Menschenlesbarkeit (ja/nein)

A4 : AFV (Strangablegeverfahren, Kunststoff-Laser-Sintern oder Laser-Strahlschmelzen)

A5 : NBV (mechanisches Stützenentfernen, chemisches Stützenentfernen, Druck-luftreinigen, Strahlen, Gleitschleifen, Fräsen, Infiltrieren, Lackieren, Glühen oder Härten)

Attribute aus Bauteilgeometrie (mögliche Attributwerte):

A6 : ebene Fläche vorhanden (ja/nein)

A7 : ausreichende Wandstärke vorhanden (ja/nein)

A8 : Boundingbox möglich (ja/nein)

A9 : Volumendurchbruch vorhanden (ja/nein)

Attribut aus Aufwand (mögliche Attributwerte):

A10 : wirtschaftliche Wertigkeit (integer)

Im Rahmen der Validierung, siehe Kapitel 6, werden spezifische Attributwerte bestimmt. Mit diesem Wissen können die Attribute A_k einer Kombination $K_{i,j}$ mit einem kundenindividuellen Auftrag und einer zugehörigen Bauteilgeometrie verglichen werden. Hierdurch wird die universale K-I-Kombinationsmatrix sukzessive durch Eliminierung von Möglichkeiten zur bauteilindividuellen K-I-Kombinationsmatrix transformiert, siehe auch Abbildung 4-4.

Ist infolgedessen mehr als eine K-I-Kombination nach der Durchführung der zwei Arbeitsschritte vorhanden, wird das Attribut für die Wirtschaftlichkeit einbezogen. Hier findet ein relativer Vergleich von übrig gebliebenen möglichen K-I-Kombinationen anhand einer vergebenen wirtschaftlichen Wertigkeit $K_{F,i,j}$ statt.

Tabelle 4-1: Universale K-I-Kombinationsmatrix

<div style="display: inline-block; transform: rotate(-45deg); transform-origin: left top; white-space: nowrap;"> A_k $K_i I_j$ </div>	Attribute aus...										
	kundenindividuellem Anforderungsprofil					Bauteilgeometrie				Auf- wand	...
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_q
$K_1 I_1$	p_{111}	p_{211}	p_{311}	p_{411}	p_{511}	p_{611}	p_{711}	p_{811}	p_{911}	p_{1011}	...
$K_1 I_2$	p_{121}	p_{212}	p_{312}	p_{412}	p_{512}	p_{612}	p_{712}	p_{812}	p_{912}	p_{1012}	...
$K_1 I_3$	p_{113}	p_{213}	p_{313}	p_{413}	p_{513}	p_{613}	p_{713}	p_{813}	p_{913}	p_{1013}	...
$K_1 I_4$	p_{114}	p_{214}	p_{314}	p_{414}	p_{514}	p_{614}	p_{714}	p_{814}	p_{914}	p_{1014}	...
$K_1 I_5$	p_{115}	p_{215}	p_{315}	p_{415}	p_{515}	p_{615}	p_{715}	p_{815}	p_{915}	p_{1015}	...
$K_2 I_1$	p_{121}	p_{221}	p_{321}	p_{421}	p_{521}	p_{621}	p_{721}	p_{821}	p_{921}	p_{1021}	...
$K_2 I_2$	p_{122}	p_{222}	p_{322}	p_{422}	p_{522}	p_{622}	p_{722}	p_{822}	p_{922}	p_{1022}	...
$K_2 I_3$	p_{123}	p_{223}	p_{323}	p_{423}	p_{523}	p_{623}	p_{723}	p_{823}	p_{923}	p_{1023}	...
$K_m I_n$	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	p_{mnq}

Legende: $K_i I_j$ = Kombination aus Kennzeichnungsträger K_i und Identifikator-art I_j ; A_k = Attribut; p_{kij} = Matriceinträge für Attributwerte

Basierend auf der strukturierten Darstellung der universalen K-I-Kombinationsmatrix in Tabelle 4-1 lässt sich nach dem Vorgehen der Informationsmodellierung eine Klasse für $K_i I_j$ ableiten. Durch diese Klasse wird das Verhalten und die Struktur an die spezifischen K-I-Kombinationen in Form von Objekten vererbt. Abbildung 4-5 zeigt die gebildete Klasse samt hinterlegter Attribute und Datentypen für die Attributwerte.

Die Attribute bilden die Informationen seitens des Kunden und der entwickelten wirtschaftlichen Wertigkeit ab. Das Attribut *dauer* definiert, ob es sich bei der Kombination $K_i I_j$ um eine lebenslange (ja/1) oder nur für den internen Prozess andauernde (nein/0) Kennzeichnung handelt. Die Attribute *maschinenlesbarkeit* und *menschenlesbarkeit* referenzieren, ob die Kombination $K_i I_j$ maschinen- und/oder menschenlesbar ist. Ausschlaggebend ist hier der Identifikator I_j . Die hinterlegten *boolean* Werte werden als ja oder nein bzw. 1 oder 0 angegeben. Zur Definition des gewünschten additiven Fertigungsverfahrens und der erforderlichen Nachbearbeitungsverfahren werden die Attribute *verfahren* und *nachbearbeitung* verwendet. Als Werte (string) werden hier die im Stand der Technik erarbeiteten

Möglichkeiten angegeben, siehe auch Kapitel 2.2 und 2.3. Zu den hier möglichen Werten gehören folgende:

Attributwerte für *verfahren*: Strangablegeverfahren (FDM), Kunststoff-Laser-Sintern (SLS) oder Laser-Strahlschmelzen (SLM)

Attributwerte für *nachbearbeitung*: mechanisches Stützenentfernen (NBV1), chemisches Stützenentfernen (NBV2), Druckluftreinigen (NBV3), Strahlen (NBV4), Gleitschleifen (NBV5), Infiltrieren (NBV6), Lackieren (NBV7), Glühen (NBV8) oder Härten (NBV9)

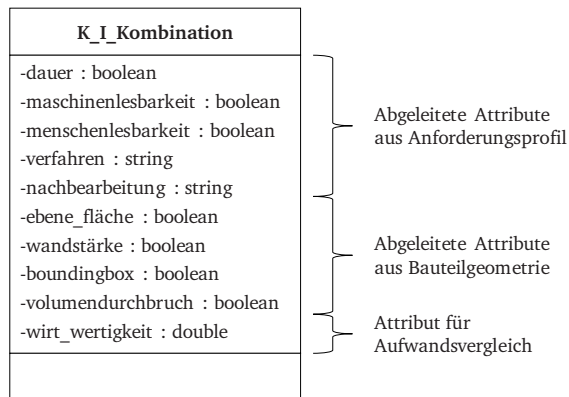


Abbildung 4-5: Klasse K-I-Kombination in UML

Die Analyse der Bauteilgeometrie führt zur Definition der Attribute *ebene_fläche*, *wandstärke*, *boundingbox* und *volumendurchbruch*. Als Werte können hier jeweils ja (1) oder nein (0) angegeben werden. Durch die Angabe der Werte wird definiert ob eine Bauteilgeometrie über eine ausreichend große ebene Fläche, ausreichend dicke Wandstärke und einen Volumendurchbruch verfügt. Ferner ist hierdurch ersichtlich, ob die analysierte Bauteilgeometrie aufgrund ihres Hüllkörpers bzw. ihrer Boundingbox für eine spezielle Art von Kennzeichnungsträger in Frage kommt. Das letzte Attribut gibt die errechnete wirtschaftliche Wertigkeit zum relativen Mehraufwandsvergleich an (double).

Die Definition der wirtschaftlichen Wertigkeit $K_{F,i,j}$ basiert auf denen für die Kombination $K_{I,j}$ zusätzlich anfallenden Fertigungs- und Nachbearbeitungsaufwände, wobei die Fertigungsaufwände anfallenden Mehraufwand für Material und Fertigungsdauer beinhalten. Die Nachbearbeitungsaufwände setzen sich zum einen aus den Aufwänden für zusätzliche Arbeitsschritte im Post-Prozess zusammen,

beispielsweise manuelles Entfernen von Kennzeichnungsträgern am Ende des Post-Prozesses. Zum anderen sind in den Nachbearbeitungsaufwänden auch Aufwände für die Betreibung von Identifikationssystemen enthalten, beispielsweise die Verwendung von kostenintensiven Ausleseeinheiten gegenüber dem Auslesen durch den Mitarbeiter bei menschenlesbaren Identifikatoren im Post-Prozess. In Anlehnung an VDI 2225 [235; 236] wird hier eine Punktbewertung basierend auf vergebenen Bewertungskriterien für eine Kombination $K_i I_j$ durchgeführt. Ergebnis ist eine Kennzahl für die wirtschaftliche Wertigkeit $K_{F,i,j}$. Diese berechnet sich wie folgt:

$$K_{F,i,j} = \frac{\text{Punktsumme } K_i I_j}{\text{ideale Punktsumme}} \text{ mit } i = 1, \dots, m \text{ und } j = 1, \dots, n$$

Für jedes Bewertungskriterium wird für eine Kombination $K_i I_j$ eine Punktzahl zwischen 0 und 4 vergeben, wobei 0 der schlechtesten und 4 der bestmöglichen Bewertung für ein Bewertungskriterium entspricht. Diese Punkte für alle Bewertungskriterien werden für eine Kombination $K_i I_j$ aufsummiert und durch die theoretisch maximal erreichbare Punktzahl dividiert. Das Ergebnis für diesen Wert von $K_{F,i,j}$ liegt immer zwischen 0 und 1. Hierdurch lassen sich die einzelnen Kombinationen $K_i I_j$ miteinander vergleichen. Eine höhere wirtschaftliche Wertigkeit $K_{F,i,j}$ weist auf eine wirtschaftlich gesehen bessere Kombination $K_i I_j$ hin.

Grundlage der universalen K-I-Kombinationsmatrix bildet neben der entwickelten Struktur das Bestimmen der technischen Umsetzbarkeit in Bezug auf die definierten Attribute A_k von jeder Kombination $K_i I_j$. Zur Definition der Attributwerte p_{kij} werden repräsentative Kombinationen $K_i I_j$ gebildet und analysiert. Wie bereits in Tabelle 4-1 zu entnehmen ist, ist die Struktur generisch aufgebaut und jederzeit erweiterbar bis zur Kombination $K_m I_n$ und zum Attribut A_q . Basierend auf dem analysierten Stand der Technik werden für die Validierung in Kapitel 6 die Attributwerte für repräsentative K-I-Kombinationen analysiert und quantitativ bestimmt. Hier werden ebenfalls die gewählten Bewertungskriterien zur Bestimmung der wirtschaftlichen Wertigkeit $K_{F,i,j}$ erläutert. Darauf aufbauend findet die Validierung und somit die Feststellung der Tragfähigkeit des Konzeptes statt.

4.4.1.2 Bestimmung bauteilindividuelle K-I-Kombinationsmatrix

Um das vom Kunden gestellte Anforderungsprofil und die Bauteilgeometrieinformationen mit den hinterlegten Attributwerten der universalen K-I-Kombinationsmatrix zu vergleichen und nicht umsetzbare Kombinationen $K_i I_j$ zu eliminieren, werden hierzu ebenfalls Klassen zu den Kundeninformationen erstellt. Dies bedeutet, dass die Informationen zu einem kundenindividuellen Auftrag aus dem

Anforderungsprofil und der Geometrie des Bauteils in die jeweiligen Attributwerte p_{kij} transformiert werden. Abbildung 4-6 zeigt die entwickelten Klassen zu den kundenspezifischen Informationen, siehe linker Abschnitt in der Abbildung. Jeder Kunde erhält eine Klasse, in denen die Metadaten zu seinem kundenindividuellen Auftrag hinterlegt sind. Hierzu zählen eine *kunden_ID*, der *name* und *vorname* sowie Adressinformationen. Ohne ein Anforderungsprofil und den relevanten Informationen zur Bauteilgeometrie kann keine individuelle Additive Fertigung stattfinden. Daher stehen diese beiden Klassen durch eine Komposition in Beziehung mit dem Kunden. Basierend auf der universalen Klasse *K_I_Kombination*, durch die alle Kombinationen K_{ij} abgebildet werden können, finden die Vergleiche der anforderungs- und geometriespezifischen Attributwerte mit eben dieser universalen Klasse und den beiden kundenspezifischen Unterklassen *Anforderungsprofil* und *Bauteilgeometrie* statt.

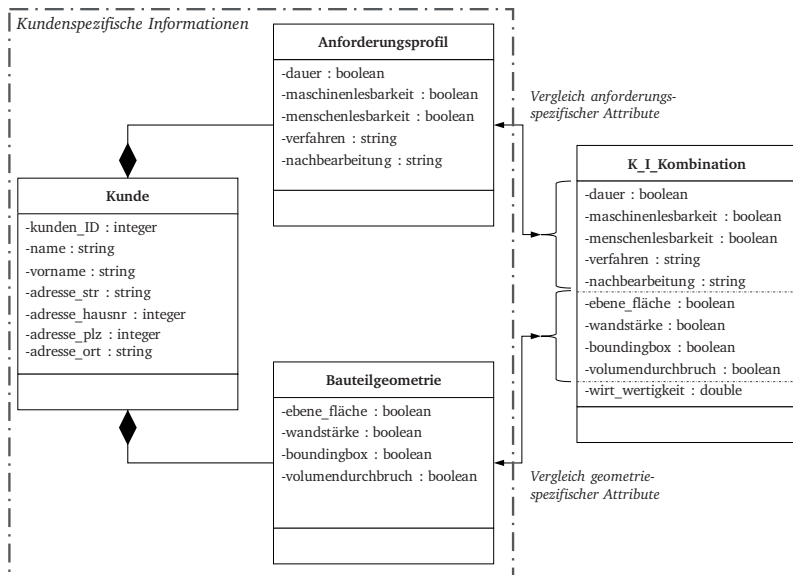


Abbildung 4-6: Auswahl der bauteilindividuellen K-I-Kombination durch Vergleichen der Attributwerte

Die erste Auswahlstufe der Methode startet, wie bereits beschrieben, mit dem anforderungsbasierten Ausschließen von K-I-Kombinationen, vergleiche Abbildung 4-4. Die Methode vergleicht die booleschen Werte zu den Attributen *dauer*, *maschinenlesbarkeit* und *mensenlesbarkeit* und streicht anschließend die nicht um-

setzbaren K-I-Kombinationen aus der universalen Matrix. Das heißt, ist in der universalen K-I-Kombinationsmatrix beispielsweise für die Kombination K_1I_4 der Wert für *menschenlesbarkeit* gleich Null (also nicht möglich), aber der Kunde stellt diese Anforderung, dann ist die Kombination K_1I_4 für den Kunden nicht umsetzbar und wird aus der Matrix gestrichen. Ferner werden die in Frage kommenden additiven Fertigungsverfahren und Nachbearbeitungsverfahren mit dem Anforderungsprofil abgeglichen. Womit sich die Matrix weiter hinsichtlich ihrer Möglichkeiten dezimiert. Diese derart dezimierte Kombinationsmatrix wird somit zu einer bauteilindividuellen K-I-Kombinationsmatrix.

In einem zweiten Schritt werden die noch vorhandenen Kombinationen K_iI_j durch die Analyse und den Abgleich der Bauteilgeometrieinformationen weiter ausgedünnt, siehe Abbildung 4-4. Ziel dieses Arbeitsschrittes ist die reduzierte bauteilindividuelle K-I-Kombinationsmatrix. Zum Vergleich der booleschen Attributwerte zu den Attributen *ebene_fläche*, *wandstärke*, *boundingbox* und *volumendurchbruch* müssen am kundenindividuellen Bauteil diese Werte vorab durch eine Analyse bestimmt werden. In den nächsten Abschnitten werden die entwickelten Logiken, welche hierzu notwendig sind, vorgestellt. Aufgrund dessen, dass der Kunde die Geometriedaten in unterschiedlichen Datenformaten bereitstellt, werden die nachfolgenden Konzeptbestandteile am Beispiel des STL-Formats hergeleitet. Diese Wahl begünstigt ebenfalls die spätere Implementierung, da bestehende Softwaremodule der Prozesskette diesen De-facto-Standard als Datenformat durchgängig verarbeiten können.

Der erste abzugleichende Attributwert umfasst das Prüfen, ob eine ausreichend große ebene Fläche am zu fertigenden Bauteil vorhanden ist. Diese ebene Fläche wird beispielsweise als Grundfläche für die Kennzeichnungsträger Materialintrusion und -extrusion in Kombination mit den Identifikatorarten Barcode oder Matrixcode erforderlich. Grundvoraussetzung für eine ebene Fläche ist, dass die Flächennormalen aneinander liegender Dreiecksfacetten in die identische Richtung zeigen, eine Abweichungstoleranz inbegriffen. Abbildung 4-7 zeigt hierzu ein einfaches Beispiel zweier benachbarter Dreiecksfacetten. Aus dem ASCII-Code lassen sich die Flächennormalen sowie die Koordinaten der einzelnen Eckpunkte der Dreiecke herauslesen. Sind, wie hier, die Flächennormalen der benachbarten Dreiecke gleich ausgerichtet, so wird anschließend der Flächeninhalt der zusammenhängenden gleich orientierten Dreiecke bestimmt.

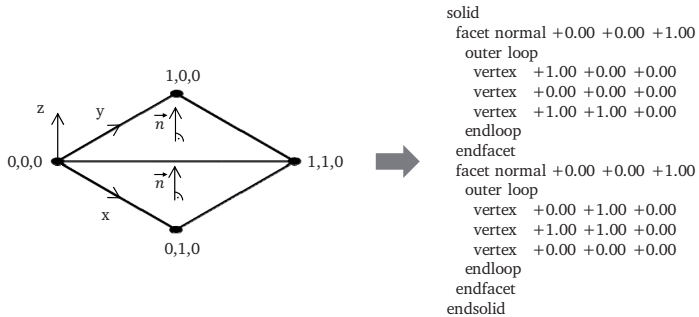


Abbildung 4-7: Ableitung von ebenen Flächen bestimmter Größe – einfaches Beispiel

Zur Bestimmung des Flächeninhaltes werden die einzelnen Flächeninhalte der Dreiecke berechnet und abschließend aufsummiert. Der Flächeninhalt jedes Dreiecks berechnet sich über das Kreuzprodukt der Vektoren der Dreiecksseiten, hierzu wird wie folgt vorgegangen:

1. Ermittlung der Ortsvektoren \vec{r}_i für jeden Dreieckspunkt A, B und C:

$$\vec{r}_i = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} \text{ mit } i = A, B \text{ und } C$$

2. Ermittlung der Vektoren der Dreiecksseiten \vec{a} , \vec{b} und \vec{c} :

$$\vec{a} = \vec{r}_C - \vec{r}_B ; \vec{b} = \vec{r}_C - \vec{r}_A ; \vec{c} = \vec{r}_A - \vec{r}_B$$

3. Berechnung des Flächeninhalts A_j über das Kreuzprodukt der Vektoren der Dreiecksseiten, da hierdurch das aufgespannte Parallelogramm berechnet wird ist die Multiplikation des Ergebnisses mit $\frac{1}{2}$ erforderlich:

$$A_j = \vec{a} \times \vec{c} = \frac{1}{2} \cdot \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ a_x & a_y & a_z \\ c_x & c_y & c_z \end{vmatrix} \text{ mit } j = 1, \dots, n$$

4. Addition aller zusammenhängender Dreiecksfacetten mit gleich ausgerichteter Flächennormalen:

$$A_{\text{gesamt}} = \sum A_j$$

Zur Sicherstellung, dass die Gesamtfläche den erforderlichen Proportionen entspricht, müssen abschließend die Seitenverhältnisse über die Summe der Dreiecksseitenlängen geprüft werden. Dies kann durch iteratives Testen mit einer

vordefinierten Fläche in Form eines Rechtecks oder eines Kreises abgefragt werden. Es wird geprüft, ob die Rechteckfläche oder die Kreisfläche in die ebene facettierte Fläche integriert werden kann. Die Kreisfläche besitzt den Vorteil, dass keine Rotation dieser notwendig ist. Die Flächengröße und die Seitenverhältnisse sind gemäß dem gewählten Kennzeichnungsträger und der Identifikatorart zu wählen, siehe hierzu auch die Gestaltungsregeln in Kapitel 4.4.2.1 und 4.4.2.2.

Ein weiterer Schritt der Bauteilgeometrieanalyse betrifft das Attribut *wandstärke*. Zur Analyse werden die erlaubten minimalen Wandstärken definiert. Da es sich hier um triangulierte Geometriedaten handelt, wird die Wandstärke in einem bestimmten Punkt der Unterseite festgelegt, in dem der kleinste euklidische Abstand jenes Punktes zu den Punkten der gegenüberliegenden Dreiecksfacette ermittelt wird. Die Oberfläche der gegenüberliegenden Fläche, welche als Endpunkt der Messlinie zur Wandstärkenbestimmung dient, wird durch einen definierten Suchkegel bestimmt. Dieser Suchkegel führt dazu, dass je nach den vorliegenden unterschiedlichen Triangulierungen keine Überschätzung der real vorliegenden Wandstärke vorliegt. Die Verwendung eines Suchkegels, welcher durch den Öffnungswinkel (max. 30°-40°) definiert wird, führt zur Messung der nahezu genau gegenüberliegenden Oberfläche in Form von Dreiecksfacetten.

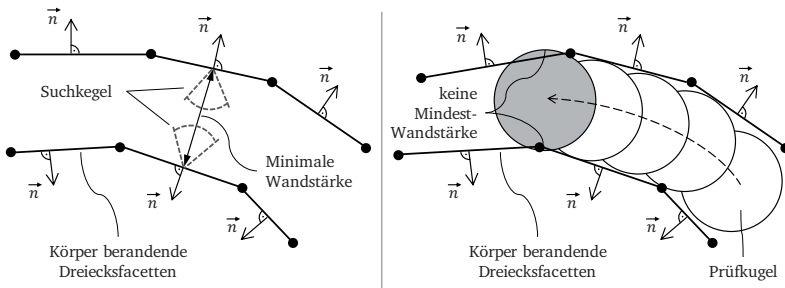


Abbildung 4-8: Schematische Darstellung der Wandstärkenanalyse

Abbildung 4-8 (links) zeigt den prinzipiellen Aufbau dieser Analyse. Analog zu dieser Vorgehensweise kann die Wandstärke auch durch eine Kugelprüfung bestimmt werden. Durchläuft eine Kugel, mit einem Durchmesser der der Mindestwandstärke entspricht, das Bauteilinnere und liegt dabei nicht an jeder Stelle innerhalb der Berandungen, so wird an diesen Stellen die erforderliche Mindestwandstärke unterschritten, siehe Abbildung 4-8 (rechts). Bereits existierende Implementierungen ermitteln hierdurch die Wandstärke zwischen gegenüberliegen-

den Flächen und schließen so auf die minimal vorliegenden Wandstärken. In Kapitel 5 wird für diese Fragestellung auf bereits existierende Softwaremodule zurückgegriffen und diese ins Gesamtkonzept implementiert.

In einem dritten Analyseschritt werden die Abmaße des Hüllkörpers bzw. der lokalen Boundingbox der Bauteilgeometrie ermittelt. Dies dient zur Entscheidungsfindung, ob ein Bauteil für die Verwendung des Kennzeichnungsträgers Hüllkörper geeignet ist. Ein Hüllkörper bzw. Käfig als Basis für den Identifikator ist nur bis zu einer bestimmten Bauteilgröße sinnvoll und umsetzbar. Durch die Analyse wird die Verwendung eines Hüllkörpers für Bauteile, die die erlaubte Dimension überschreiten, ausgeschlossen. Zur Berechnung des Hüllkörpers im dreidimensionalen Raum werden aus der Bauteilgeometrie die maximalen Seitenlängen x, y und z des lokalen Bauteilkoordinatensystems aus dem ASCII-Code zur Bauteilgeometrie abgeleitet, siehe Abbildung 4-9. Die Koordinatenwerte der Eckpunkte sind zur Bestimmung der Boundingbox hier nicht erforderlich.

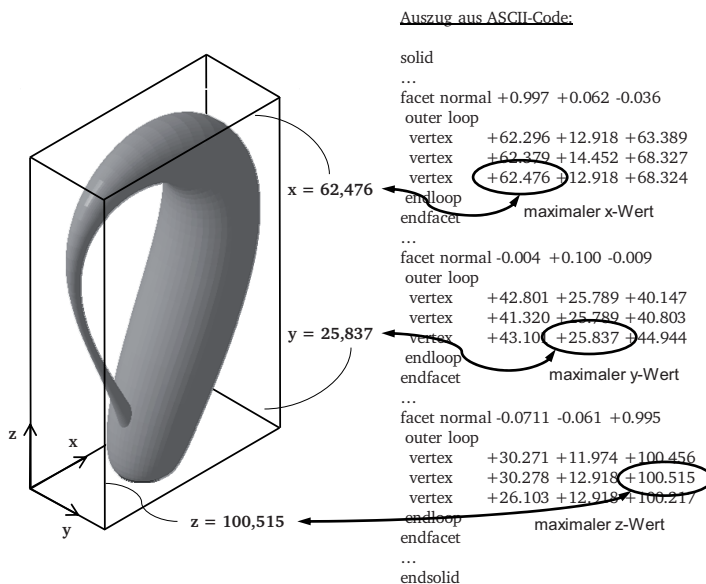


Abbildung 4-9: Bestimmung lokaler Hüllkörper von Bauteilgeometrie – Beispiel

Die Verwendung eines partiell umschließenden Kennzeichnungsträgers in Form eines Formelements erfordert einen Volumendurchbruch in der Bauteilgeometrie. Es existieren verschiedene Arten von Volumenmodellen, die als Repräsentation

der Bauteilgeometrie dienen. Für die Herleitung der Prüfung auf Volumendurchbrüche in der Bauteilgeometrie ist hier der Typ *Boundary Representation* (B-Rep) von Interesse. B-Rep-Modelle beschreiben Volumen in expliziter, objekt- und berandungsorientierender Weise [227], wobei Volumen in der B-Rep-Darstellung durch eine endliche Anzahl begrenzender Flächen vom umgebenden Raum getrennt sind [219]. Die Flächen werden hier durch eine Menge von Kanten definiert, diese wiederum werden durch Eckpunkte definiert. B-Rep-Modelle werden auch als topologisch-geometrische Strukturmodelle bezeichnet, da sie in ihrer Datenstruktur Informationsmengen zu Topologie und zu Geometrie enthalten [227].

In der Informationsmenge Geometrie wird die Gestalt und die relative Lage im Objektraum beschrieben [219]. Die zu beschreibenden geometrischen Elemente sind das geometrische Volumen, die Fläche, die Linie und der Punkt. Zusätzlich wird die Information verarbeitet, auf welcher Seite der Fläche sich das zu umrandende Volumen befindet [233]. Die Informationsmenge zur Topologie beschreibt die Anordnung und die Lage der topologischen Elemente zueinander, sprich die Struktur des Objektes [227]. Beschreibbare topologische Objekte sind der Körper, der Oberflächenverbund, die Oberfläche, die Berandung, die Kante sowie die Eck- und Endpunkte [219; 233]. Die Gliederung in topologische und geometrische Elemente in der B-Rep-Datenstruktur unterstützt die Flexibilität und die generische Beschreibung der Datenmodelle. Allerdings ist hier sicherzustellen, dass die Konsistenz der Modelle hinsichtlich der Topologie gewährleistet wird. Die topologische Korrektheit wird über die sogenannte Euler-Formel sichergestellt, welche eine Grundlage für die Analyse bildet [219; 227]. Für eine Berücksichtigung von Löchern, Volumendurchbrüchen und Schalen der Bauteilgeometrie reicht diese Formel jedoch nicht aus. Hierzu wird die erweiterte Euler-Formel, die sogenannte Euler-Poincaré-Formel verwendet [219]. Diese Formel setzt sich wie folgt zusammen:

$$V - E + F = 2 \cdot (S - R) + H$$

Mit: V = Anzahl der Eck-/Endpunkte (Vertices),

E = Anzahl der Kanten (Edges),

F = Anzahl der Flächen (Faces),

S = Anzahl der äußeren oder inneren Oberflächen (Shells),

R = Anzahl der „Volumendurchbrüche“ im Körper (Rings) und

H = Anzahl der „Löcher“ in den Flächen (Holes).

Als sekundäres Modell der B-Rep-Modelle wird auf sogenannte *Facettenmodelle* zurückgegriffen [219]. Diese approximieren die Flächeninhalte des Modells einer exakten B-Rep-Beschreibung. Somit sind Facettenmodelle ebenfalls B-Rep-Modelle, welche jedoch Objekte mit einem eingeschränkten Vorrat an Grundelementen repräsentieren [219]. Die Beschreibung der Bauteilgeometrie mittels des STL-Formates entspricht demnach einer vereinfachten B-Rep-Beschreibung, da es sich um ein Facettenmodell handelt. Aufgrund dessen kann die oben gezeigte Euler-Poincaré-Formel für die Verarbeitung von STL-Dateien verwendet werden. Die Konsistenz von STL-Dateien wird ebenfalls basierend auf den Facetten, Punkten und Flächennormalen ermittelt. Intern ablaufende Algorithmen analysieren hierdurch die Anzahl an Löchern, ob die Flächen geschlossen sind oder ob Flächennormalen falsch orientiert sind. Hierdurch wird die Fehlerfreiheit und Konsistenz der STL-Datei festgestellt. Basierend auf einem derart festgestellten konsistenten Facettenmodell lässt sich die Euler-Poincaré-Formel verwenden. Um die Anzahl der Volumendurchbrüche festzustellen wird diese Formel umgestellt und für diese Fragestellung in anderer Art verwendet:

$$R = -1 \cdot \left(\frac{V - E + F - H}{2} - S \right)$$

Die Umstellung nach der Anzahl der *Volumendurchbrüche* R und somit deren Bestimmung darf nur nach vorab geprüfter Konsistenz der STL-Datei erfolgen. Abbildung 4-10 zeigt beispielhaft die Bestimmung von R basierend auf den ausgelesenen Elementen. Werden die ausgelesenen Werte der konsistenten STL-Datei in obige Formel eingesetzt ergibt sich für die Anzahl der *Volumendurchbrüche* R folgendes Ergebnis:

$$R = -1 \cdot \left(\frac{1264 - 3828 + 2552 - 0}{2} - 1 \right) = 7$$

Dieses Ergebnis stimmt mit der Anzahl der im Bauteil vorhandenen Volumendurchbrüche überein, siehe auch Abbildung 4-10 die graphische Notation in der Drauf- und Seitenansicht. Die Überprüfung der Querschnittsflächen dieser Volumendurchbrüche wird im späteren Verlauf der Methode und in der Implementierung durchgeführt. Hier kommen Kollisionsprüfungen zwischen Bauteilgeometrie und partiell körperumschließendem Formelement zum Einsatz.

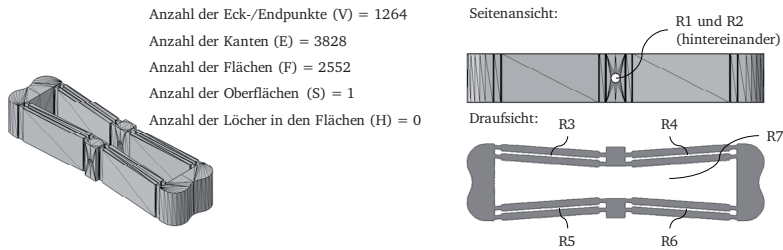


Abbildung 4-10: Anzahl von Volumendurchbrüchen basierend auf STL-Datei – am Beispiel eines Festkörpergelenks

Sind die beschriebenen vier Analyseschritte zur Bauteilgeometrie durchlaufen, so liegt die reduzierte bauteilindividuelle K-I-Kombinationsmatrix vor, siehe Abbildung 4-4. Für den formulierten Fall, dass mehr als eine Kombination $K_i I_j$ in Frage kommt wird der wirtschaftliche Vergleich zwischen den verbliebenen Kombinationen angewendet.

4.4.2 Anbringung von K-I-Kombination an Bauteil

Die zweite Auswahlstufe der Methode umfasst das Anbringen der ausgewählten Kombination $K_i I_j$ an das zu fertigende Bauteil. Für eine fertigungs- und nachbearbeitungsgerechte Anbringung der Kennzeichnungskombinationen liegen keine Regeln oder Richtlinien vor. Beim fertigungs- und nachbearbeitungsgerechten Gestalten muss die Gestalt der Kennzeichnungskombination so festgelegt werden, dass mit den ausgewählten Verfahren eine problemlose Herstellung in guter Qualität erreicht wird [62]. Daher bilden das Herleiten und Beschreiben von *Kennzeichnungsregeln* den Kern der Arbeiten in der zweiten Auswahlstufe, siehe auch die erforderlichen Steuergrößen in Abbildung 4-3. Übergeordnete Gestaltungsrichtlinien liegen zur Verwendung in der Additiven Fertigung bereits vor, siehe Kapitel 2.4.1. Neben diesem Portfolio an erarbeiteten Regeln und den Grundregeln *eindeutig*, *einfach* und *sicher* sind für den vorliegenden Anwendungsfall spezielle Regeln zu erarbeiten [7; 98]. Diese speziellen Gestaltungsregeln werden auch als *Design for X* bezeichnet und werden für besondere Anwendungsfälle verwendet [98]. Im Folgenden werden daher spezielle Regeln für das *kennzeichnungsträger-* und *identifikatorgerechte Gestalten* erarbeitet und beschrieben. Diese Regeln gilt es bei der Anbringung der Kombinationen $K_i I_j$ an die Bauteilgeometrie zu berücksichtigen. Die Regeln werden an dieser Stelle verfahrensunabhängig er-

arbeitet, die Prüfung auf Machbarkeit einer Kombination $K_i I_j$ mit einem bestimmten Verfahren erfolgt in der Erstellung der universalen Kombinationsmatrix, siehe Kapitel 6. Im Folgenden werden daher generelle Regeln definiert.

Nachdem die einzelnen Gestaltungsregeln erläutert sind, werden die erforderlichen Abfragen und Abläufe zur Komplettierung der Methode beschrieben.

4.4.2.1 Kennzeichnungsträgerechte Gestaltungsregeln

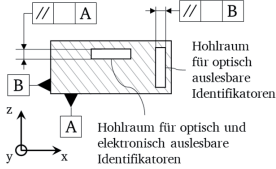
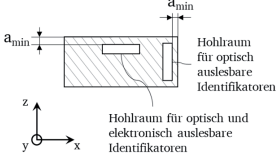
Die Gestaltungsregeln für die Anbringung der Kennzeichnungsträger sollen für die ausgewählten Kennzeichnungsträger volumenintegrierte Hohlraumeinbringung, oberflächenintegrierte Materialintrusion (Subtraktion), oberflächenintegrierte Materialextursion (Addition), oberflächenintegrierte Formelementanbringung (Flächenanbau), körperumschließender Hüllkörper und partiell körperumschließendes Formelement erstellt werden. Ziel ist es, einen Regelkatalog mit kennzeichnungsträgerspezifischen Gestaltungsregeln zu erstellen, daher werden die erarbeiteten Regeln nachfolgend jeweils tabellarisch festgehalten.

Generelle Regeln für volumenintegrierte Hohlraumeinbringung

Für die volumenintegrierte Hohlraumeinbringung als Kennzeichnungsträger müssen verschiedene Abmessungen, Ausrichtungen relativ zum Bauteil und Abstände zu Bauteilflächen berücksichtigt werden. Die hieraus abgeleiteten Regeln sind Tabelle 4-2 zu entnehmen. Dabei gilt es, die empfohlenen Mindest- und Maximalwerte mit Toleranzen zu versehen, hierdurch können zum einen Modellungenauigkeiten und zum anderen leichte Abweichungen in der Geometrie berücksichtigt werden. Die Vergabe und Beachtung gilt auch für Lagetoleranzen.

Tabelle 4-2: Generelle Regeln für volumenintegrierte Hohlraumeinbringung

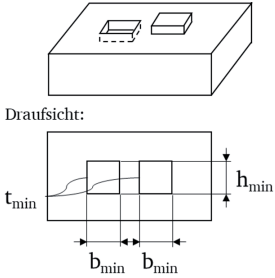
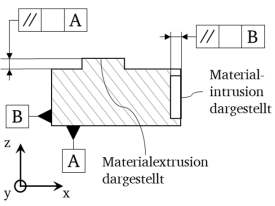
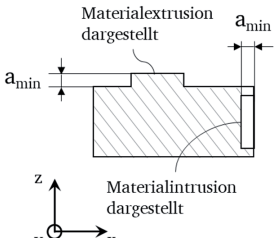
Nr.;Bezo- gen auf	Beschreibung	Beispielskizze
K1.1; Größe des Hohlraumes	Die Größe des Hohlraumes (b_{\min} , h_{\min} , t_{\min}) sollte so groß sein, dass ausreichend Platz für den optisch oder elektronisch auslesbaren Identifikator vorliegt. Die erforderliche Größe ist abhängig von den identifikatorgerechten Gestaltungsregeln. Dabei sollte der Hohlraum nur maximal so groß sein wie nötig, um unnötige Bauteilschwächungen zu verhindern.	

Nr.;Bezo- gen auf	Beschreibung	Beispielskizze
K1.2; Ausrichtung des Hohlraumes	<p>Der Hohlraum sollte im Optimalfall parallel zu einer ebenen Bauteiloberfläche eingebracht werden. Bei optisch auslesbaren Identifikatoren parallel zur x-y-Ebene oder zur z-Achse des Bauraums, da hierdurch eine optimale Fertigungsqualität erreicht werden kann. Bei elektronisch auslesbaren Identifikatoren sollte der Hohlraum parallel zur x-y-Ebene eingefügt werden, da das Einlegen von RFID-/NFC-Transpondern anlagenbedingt nur in dieser Ebene gewährleistet wird.</p>	
K1.3; Abstand zu Bauteiloberfläche	<p>Der Abstand des Hohlraumes (a_{\min}) sollte so nah an der Bauteiloberfläche liegen, dass ein problemloses Auslesen je nach Identifikatorart gewährleistet wird. Dabei ist auf das Einhalten der Mindestwandstärke für a_{\min} zu achten.</p>	

Generelle Regeln für oberflächenintegrierte Materialintrusion und -extrusion

Die Ähnlichkeit bei der Verwendung der oberflächenintegrierten Materialintrusion und -extrusion erlaubt es, die Regeln parallel zu erarbeiten. Letztendlich differenzieren sich die beiden Kennzeichnungsträgerarten nur in den Ausprägungen zu Größe, Ausrichtung und Höhe bzw. Tiefe der Extrusion bzw. Intrusion. Tabelle 4-3 fasst die theoretischen Regeln zusammen.

Tabelle 4-3: Generelle Regeln für oberflächenintegrierte Materialintrusion und -extrusion

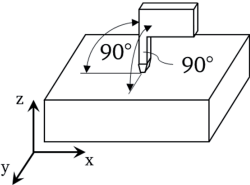
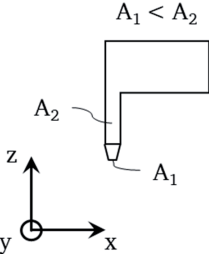
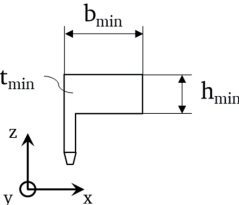
Nr.;Bezo- gen auf	Beschreibung	Beispielskizze
K2.1; Größe des Materialin- trusion/-extrusion	Die Größe der Materialintrusion oder -extrusion (b_{\min} , h_{\min} , t_{\min}) sollte so groß sein, dass ausreichend Platz für den optisch auslesbaren Identifikator vorliegt. Die erforderliche Größe ist abhängig von den identifikatorgerechten Gestaltungsregeln.	 <p>Draufsicht:</p>
K2.2; Ausrichtung der Ma- terialintrusion/-extrusion	Die Materialintrusion oder -extrusion sollte im Optimalfall auf einer ebenen Bauteiloberfläche eingebracht werden. Bei optisch auslesbaren Identifikatoren soll die Ausrichtung parallel zur x-y-Ebene oder zur z-Achse des Bauraums erfolgen, da hierdurch eine optimale Fertigungsqualität erreicht werden kann.	
K2.3; Tiefe/Höhe der Mate- rialintrusion/-extrusion	Die Materialintrusion bzw. -extrusion sollte mit einer maximal notwendigen Tiefe bzw. Höhe eingebracht werden (a_{\min}). Hierdurch wird gewährleistet, dass identifikatorabhängig das Auslesen ermöglicht wird. Wobei die Höhe bzw. Tiefe nicht größer als notwendig gestaltet werden sollte.	

Generelle Regeln für oberflächenintegrierte Formelementanbringung

Bei der Verwendung einer oberflächenintegrierten Formelementanbringung, in Form eines angebrachten Fähnchens, sind Regeln hinsichtlich der Stabilität, des zugänglichen Entfernens und einer ausreichenden Fläche zum Anbringen des

Identifikators zu berücksichtigen. Diese Informationen sind in Tabelle 4-4 dargestellt.

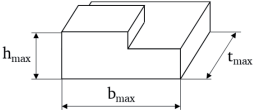
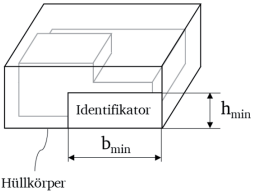
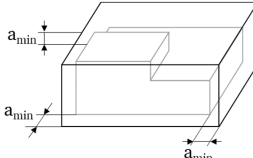
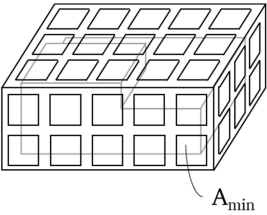
Tabelle 4-4: Generelle Regeln für oberflächenintegrierte Formelementanbringung

Nr.; Bezo- gen auf	Beschreibung	Beispielskizze
K3.1; Ausrichtung des Form- elementes	Das Formelement, in Form eines Fähnchens, sollte orthogonal (mindestens 90°) auf eine ebene Fläche am Bauteil angebracht werden. Dies führt zu einer besseren mechanischen Entfernung des Formelementes nach dem Post-Prozess. Bei konkaven Flächen kann die Entfernung zu Schwierigkeiten hinsichtlich der Zugänglichkeit führen.	
K3.2; Ausprägung der Formele- mentanschlussstelle	Zur besseren Entfernung des Formelementes soll dieses durch eine ausreichend starke Sollbruchstelle am Bauteil angebracht werden. Hierdurch wird das Entfernen erleichtert und die betroffene Anbringungsfläche auf ein Minimum dezimiert. Es ist jedoch auf einen ausreichenden Querschnitt (A_1) zu achten, damit das Formelement nicht während des Post-Prozesses beschädigt wird.	
K3.3; Größe des Formele- mentes	Die Größe des Formelementes (b_{\min} , h_{\min} , t_{\min}) sollte so groß sein, dass ausreichend Platz für den optisch auslesbaren Identifikator vorliegt. Die erforderliche Größe ist abhängig von den identifikatorgerechten Gestaltungsregeln. Dabei ist auf das Einhalten der Mindestwandstärke für t_{\min} zu achten.	

Generelle Regeln für körperumschließenden Hüllkörper

Ähnlich wie bei der Verwendung einer oberflächenintegrierten Formelementanbringung erfordert der körperumschließende Hüllkörper ebenfalls eine ausreichende Fläche zur Anbringung eines optisch auslesbaren Identifikators. Darüber hinaus ist eine maximale Bauteilgeometrie einzuhalten, siehe Tabelle 4-5.

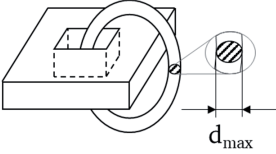
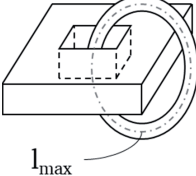
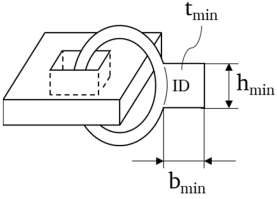
Tabelle 4-5: Generelle Regeln für körperumschließenden Hüllkörper

Nr.;Bezo- gen auf	Beschreibung	Beispielskizze
K4.1; Abmessung des Hüllkörpers	Die Verwendung von Hüllkörpern sollte nur bei Bauteilen einer definierten maximalen Größe (b_{\max} , h_{\max} , t_{\max}) verwendet werden. Da dies bei sehr großen und komplexen Bauteilen zu unnötigem Materialaufwand führt.	
K4.2; Größe des Hüllkörpers	Die Größe des Hüllkörpers (b_{\min} , h_{\min} , t_{\min}) sollte so groß sein, dass ausreichend Platz für den optisch auslesbaren Identifikator vorliegt. Elektronisch auslesbare Identifikatoren sind für die rein unternehmensinterne Verwendung nicht wirtschaftlich. Die erforderliche Größe ist abhängig von den identifikatorgerechten Gestaltungsregeln.	
K4.3; Abstände zu Hüllkörper	Die Abstände (a_{\min}) zwischen Bauteilgeometrie und Hüllkörper sollten so groß gewählt werden, dass kein Anhaften der beiden Geometrien nach der Fertigung vorliegt und ein problemloses Trennen beider Geometrien möglich ist.	
K4.4; Ausführung des Hüllkörpers	Der Hüllkörper sollte eine Gitterstruktur aufweisen bzw. die Möglichkeit zum Entfernen von eingeschlossenem Pulver oder Stützmaterial bieten. Hier ist auf einen Mindestquerschnitt (A_{\min}) zu achten.	

Generelle Regeln für partiell körperumschließendes Formelement

Abschließend werden Regeln zur Verwendung eines partiell körperumschließenden Formelementes in Tabelle 4-6 aufgezeigt. Diese umfassen die Ausprägung des Formelementes hinsichtlich des Mindest- und Maximaldurchmessers, der maximal sinnvollen Splinelänge sowie die Berücksichtigung einer ausreichend großen Fläche für die Anbringung eines Identifikators.

Tabelle 4-6: Generelle Regeln für partiell körperumschließendes Formelement

Nr.;Bezo- gen auf	Beschreibung	Beispielskizze
K5.1; Durchmesser des Formelementes	Das Formelement, in Form eines partiell körperumschließenden Ringes, sollte einem definierten Querschnittsdurchmesser (d_{\max}) entsprechen. Das Auslegen des Querschnitts zwischen einem Minimal- und Maximaldurchmesser führt zu einem optimalen Materialeinsatz und führt zur leichteren Handhabung im Post-Prozess. Hierdurch können auch kleinere Volumendurchbrüche hinsichtlich des Querschnitts verwendet werden.	 Die Skizze zeigt eine Draufsicht auf ein rechteckiges Bauteil mit einem U-förmigen Ausschnitt. Ein Ring ist teilweise um das Bauteil herumgeführt. Ein Querschnitt des Rings ist vergrößert dargestellt, um den Durchmesser d_{\max} zu verdeutlichen.
K5.2; Länge des Formelementes	Das Formelement, in Form eines partiell körperumschließenden Ringes, sollte eine maximale Splinelänge (l_{\max}) nicht überschreiten. Hierdurch wird Material optimal eingesetzt und es findet eine einfachere Handhabung im Post-Prozess statt.	 Die Skizze zeigt eine Draufsicht auf ein rechteckiges Bauteil mit einem U-förmigen Ausschnitt. Ein Ring ist teilweise um das Bauteil herumgeführt. Eine gestrichelte Linie markiert die maximale Splinelänge l_{\max} des Rings.
K5.3; Größe des Formelementes	Die Größe des Formelementes (b_{\min} , h_{\min} , t_{\min}) sollte so groß sein, dass ausreichend Platz für den optisch auslesbaren Identifikator vorliegt. Die erforderliche Größe ist abhängig von den identifikatorgerechten Gestaltungsregeln. Dabei ist auf das Einhalten der Mindestwandstärke für t_{\min} zu achten.	 Die Skizze zeigt eine Draufsicht auf ein rechteckiges Bauteil mit einem U-förmigen Ausschnitt. Ein Ring ist teilweise um das Bauteil herumgeführt. Die Mindestabmessungen des Rings sind markiert: b_{\min} (Breite), h_{\min} (Höhe) und t_{\min} (Wandstärke). Ein Identifikator (ID) ist auf der Innenseite des Rings eingezeichnet.

4.4.2.2 Identifikatorgerechte Gestaltungsregeln

Die zu berücksichtigenden Gestaltungsregeln für die identifikatorgerechte Auslegung werden für die hier Betrachtung findenden Identifikatoren optische Zeichenerkennung (OCR), Barcode, Dotcode, QR-Code und die RFID-/NFC-Technologie beschrieben. Die identifikatorgerechten Gestaltungsregeln umfassen primär die erforderlichen Größen und Verhältnisse der eingesetzten Identifikatorarten. Diese müssen verfahrensspezifisch in umfangreichen Messreihen erarbeitet werden. Hier wird die theoretische Grundlage dazu gebildet. In der Validierung in Kapitel 6 werden repräsentative Verfahren ausgewählt, mit denen die Machbarkeit des Konzeptes nachgewiesen wird. Der Übersichtlichkeit halber werden nachstehend die Regeln zu den einzelnen Identifikatorarten zusammengefasst in Tabelle 4-7 dargestellt.

Tabelle 4-7: Generelle identifikatorgerechte Gestaltungsregeln (fortlaufend)

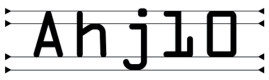
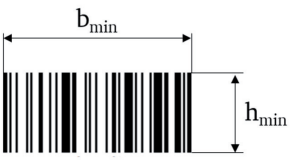
Be- trifft	Nr.;Bezo- gen auf	Beschreibung	Beispielskizze
Optische Zeichenerkennung	11.1; Schriftart	Für ein problemloses maschinelles Auslesen und das Auslesen durch den Menschen sollte die Schriftart OCR A verwendet werden.	Kundenindividuelle ADDITIVE FERTIGUNG 2018
	11.2; Größe der Klarschrift	Die Schriftgröße muss für eine gewisse Größe aufweisen, um maschinen- und menschenlesbar zu sein. Nach [116] sollte diese eine Größe von 18 pt aufweisen, allerdings gilt es, diese im Einzelfall zu überprüfen. Die Größe der Schriftart ist abhängig vom Auflösungsvermögen des gewählten Verfahrens.	
Barcode	12.1; Größe des Barcode	Die Flächengrößen des Barcodes (b_{\min} , h_{\min}) sollte eine ausreichende Größe aufweisen, um maschinenlesbar zu sein.	

Tabelle 4-7: Generelle identifikatorgerechte Gestaltungsregeln (fortlaufend)


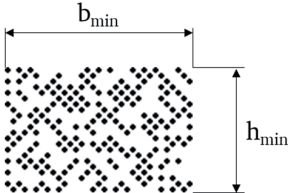
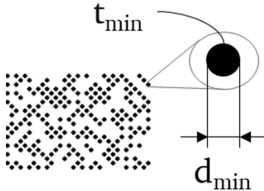
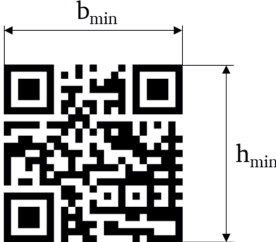
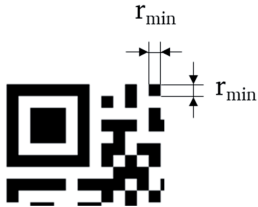
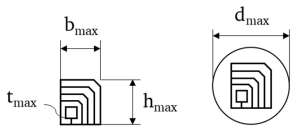
Be- trifft	Nr.;Bezo- gen auf	Beschreibung	Beispielskizze
	12.2; Strichbreiten und -abstände	Die Strichbreiten (s_{\min}) und -abstände (l_{\min}) sollten ausreichende Zwischenräume zu einander haben, um je nach Kennzeichnungsträger Pulverreste leicht zu entfernen und ein sicheres Auslesen zu gewährleisten.	
Dotcode	13.1; Größe des Dotcode	Die Flächengrößen des Dotcodes (b_{\min} , h_{\min}) sollte eine ausreichende Größe aufweisen, um maschinenauslesbar zu sein und die zylindrischen Extrusionen bzw. Intrusionen eindeutig voneinander unterscheiden zu können.	
	13.2; Punktgröße	Die Durchmesser (d_{\min}) und Tiefe (t_{\min}) der zylindrischen Extrusionen bzw. Intrusionen sollten ausreichend groß gewählt werden. Die gewählte Tiefe von Punkten im Material muss das Entfernen von Pulver- bzw. Stützstrukturen ermöglichen.	
QR-Code	14.1; Größe des QR-Code	Die Flächengröße des QR-Codes (b_{\min} , h_{\min}) sollte eine ausreichende Größe aufweisen, um maschinenauslesbar zu sein.	

Tabelle 4-7: Generelle identifikatorgerechte Gestaltungsregeln (fortlaufend)

Be- trifft	Nr.;Bezo- gen auf	Beschreibung	Beispielskizze
	14.2; Auflösung QR-Code	Die rechteckigen Bestandteile (r_{\min}) des Codes müssen vom jeweiligen Verfahren hinsichtlich des Auflösungsvermögens darstellbar sein.	
RFID/NFC	I5.1; Größe des RFID-/NFC-Transponders	Die Größe der RFID-/NFC-Transponder (b_{\max} , h_{\max} , t_{\max} oder d_{\max}) sollte so gering wie möglich gewählt werden, da dies eine geringere Schwächung der Baueilstruktur bei der Einbringung in einen Hohlraum hervorruft.	

4.4.2.3 K-I-Kombination an Bauteil anbringen

Basierend auf den hergeleiteten Kennzeichnungsregeln werden in diesem Abschnitt die erforderlichen Aktivitäten erläutert, welche zum gekennzeichneten Bauteil führen, vergleiche Abbildung 4-3. Neben den Kennzeichnungsregeln als Steuergröße bildet die ausgewählte K-I-Kombination als Eingangsgröße einen essentiellen Bestandteil der Aktivität *K-I-Kombination an Bauteil anbringen*. Das Anbringen der ausgewählten Kennzeichnungskombination ist abhängig von Kennzeichnungsträger und Identifikator. Je nachdem, welche Kombination $K_i I_j$ vorliegt, werden spezifische Aktivitäten durchlaufen. Abbildung 4-11 zeigt den allgemeingültigen Ablauf für die Anbringung der K-I-Kombination am Bauteil, dargestellt als UML-Aktivitätsdiagramm.

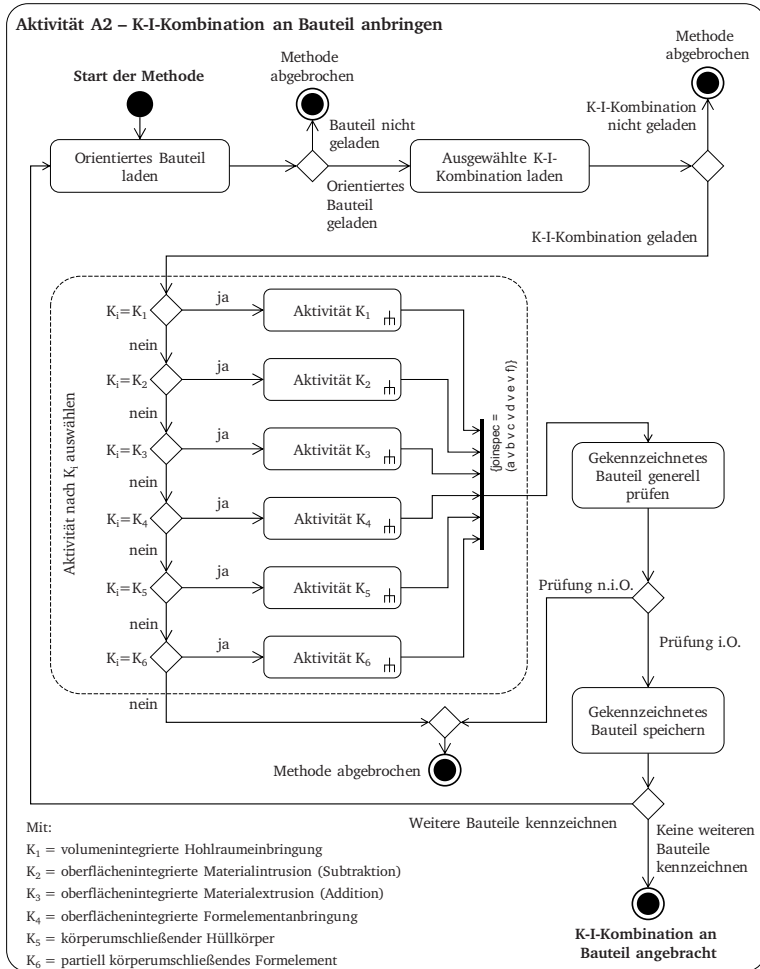


Abbildung 4-11: Ablauf der Aktivität A2 – K-I-Kombination an Bauteil anbringen

Die Methode startet mit dem Laden des orientierten Bauteils. Ist dieses geladen, wird die ausgewählte Kombination $K_i I_j$ geladen. Der jeweilige Kennzeichnungsträger ist primär für die Art der Anbringung und somit für die Wahl der Aktivität verantwortlich. Da dieser die Geometrie des Bauteils verändert, findet im weiteren Verlauf der Aktivität A2 die Abfrage, um welchen Kennzeichnungsträger K_i es sich handelt, statt. Die spezifischen Aktivitäten K_1 bis K_6 werden im Anschluss beschrie-

ben. In diesen spezifischen Aktivitäten sind die kennzeichnungsträger- und identifikatorgerechten Gestaltungsregeln von immenser Bedeutung. Nach Durchführung der spezifischen Aktivitäten wird das gekennzeichnete Bauteil einer generellen Prüfung unterzogen. Diese Prüfung umfasst zum einen das Prüfen auf Durchdringungen in der Bauteilgeometrie sowie das nochmalige Prüfen auf Einhalten von Mindestwandstärken. Zum anderen findet erneut eine Prüfung der Bauteilgeometrie auf Konsistenz statt. Ist diese Prüfung erfolgreich, wird das gekennzeichnete Bauteil gespeichert und die Methode wird beendet. Gemäß der Prozesskette zur kundenindividuellen Additiven Fertigung werden in einem nächsten Prozessschritt die gekennzeichneten Bauteile gemeinsam im virtuellen Bauraum positioniert, siehe Abbildung 4-2.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die kennzeichnungsträgerspezifischen Aktivitäten K_1 bis K_6 in ihren Abläufen aufgezeigt und beschrieben. Einige Schritte sind bei den verschiedenen Kennzeichnungsträgern identisch, daher werden diese nur einmal erläutert. In diesen Einzelaktivitäten bzw. Funktionen werden die jeweils ausgewählten Identifikatoren I_j adressiert und verarbeitet. Dabei folgen die kennzeichnungsträger- und identifikatorspezifischen Aktivitäten dem gleichen Ablauf, siehe Abbildung 4-12. Die Aktivität K_i startet mit der Definition eines oder mehrerer Referenzelemente. Die Ausprägung dieser ist abhängig von den erarbeiteten kennzeichnungsträgergerechten Gestaltungsregeln. Basierend auf den Referenzelementen wird anschließend der ausgewählte Kennzeichnungsträger generiert. In Folge dessen wird der Identifikator in den Kennzeichnungsträger integriert. Anschließend werden die erzeugten Geometrien je nach Art durch boolesche Operatoren mit der Bauteilgeometrie vereinigt oder von dieser subtrahiert. Es besteht auch die Möglichkeit keinen Operator anzuwenden, siehe Erläuterungen zur Aktivität K_5 und K_6 , mit diesem Schritt endet die Aktivität K_i .

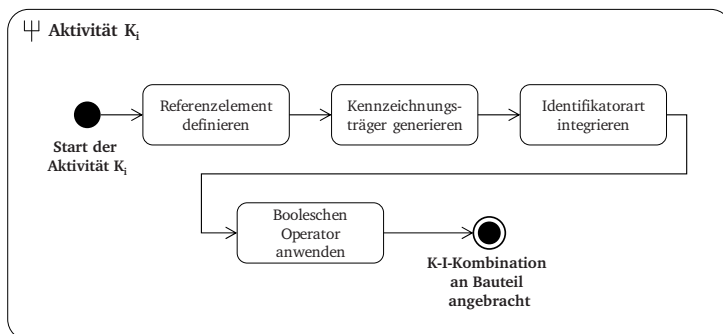


Abbildung 4-12:Ablauf der Aktivität K_i

Nachstehend werden die Einzelheiten zu den jeweiligen Aktivitäten erläutert, die Verweise auf die Nummerierung der Gestaltungsregeln sind Tabelle 4-2 bis Tabelle 4-7 zu entnehmen.

Aktivität K₁ – Anbringung volumenintegrierter Hohlraum

Gemäß der Gestaltungsregel K1.2 wird als Referenzelement eine ebene Fläche mit ausreichender Größe zur Anbringung des Identifikators benötigt. Diese Fläche sollte gemäß genannter Gestaltungsregel parallel zur x-y-Ebene oder parallel zur z-Achse liegen. Ist an der Bauteilgeometrie dieses Referenzelement mittels der bereits beschriebenen Analyse definiert, siehe Kapitel 4.4.1.2, wird der Kennzeichnungsträger an diesem Element ausgerichtet. Hierbei wird auf die einzuhaltenden Mindestabstände entsprechend der Gestaltungsregel K1.3 geachtet. Die Größe des einzubringenden Hohlraumes ist nach Gestaltungsregel K1.2 abhängig von der zu integrierenden Identifikatorart. Der Identifikator wird in einem nächsten Schritt als Template geladen und in das Bauteil integriert, wobei eine fortlaufende Aktualisierung hinsichtlich der hinterlegten Nummerierung erfolgt. Abschließend findet die Subtraktion des eingebrachten Identifikators über die Verwendung des booleschen Operators statt. Hierdurch wird die Bauteilgeometrie vereint, so dass eine additiv fertigbare Geometrie entsteht. Abbildung 4-13 (links) zeigt die Hohlraumeinbringung eines QR-Codes als Identifikator in die Bauteilgeometrie. Die gewählte Größe des QR-Codes basiert auf der Gestaltungsregel I4.1 sowie auf der Ausprägung der einzelnen rechteckigen Bestandteile des Codes gemäß Gestaltungsregel I4.2. Für die Wahl eines anderen Identifikators werden dementsprechend die geltenden Regeln für eine identifikatorgerechte Auslegung berücksichtigt. Die Hohlraumeinbringung eines RFID-Transponders ist in Abbildung 4-13 (rechts) ebenfalls beispielhaft abgebildet. Die Größe des Transponders wird nach Gestaltungsregel I5.1 eingehalten.

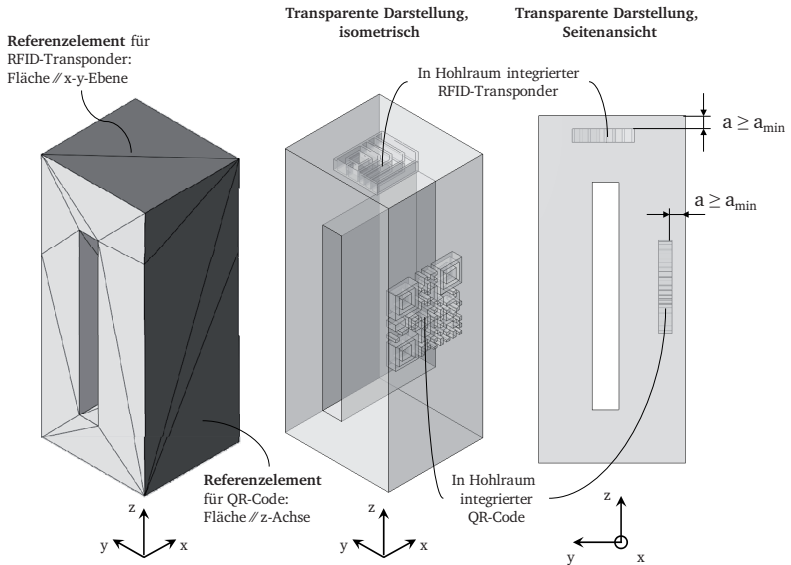


Abbildung 4-13: Beispiel – volumenintegrierte Hohlraumeinbringung mit QR-Code (links) und RFID-Transponder (rechts) als Identifikatoren

Aktivität K₂ und K₃ – Anbringung oberflächenintegrierte Materialintrusion und -extrusion

Das Anbringen der Kennzeichnungsträger oberflächenintegrierte Materialintrusion und -extrusion erfordert die Definition der identischen Referenzelemente wie bei der volumenintegrierten Hohlraumeinbringung, wobei hier die Gestaltungsregeln für ein kennzeichnungsträgerechtes Anbringen K2.1, K2.2 und K2.3 greifen. Der Unterschied zwischen Materialintrusion und -extrusion liegt in der Anwendung unterschiedlicher boolescher Operatoren. Nach Integration des ausgewählten Identifikators wird bei der oberflächenintegrierten Materialintrusion der boolesche Operator Subtraktion angewendet. Demgegenüber steht die Vereinigung als boolesche Operation für die Integration der oberflächenintegrierten Materialextrusion. Abbildung 4-14 zeigt beispielhaft die Kombination aus Materialextrusion und Dotcode (links) sowie die Kombination aus Materialintrusion und Barcode (rechts). Für die Integration des Dotcodes werden die Gestaltungsrichtlinien I3.1 und I3.2 hinsichtlich der Größenverhältnisse berücksichtigt. Gemäß der Gestaltungsrichtlinien I2.1 und I2.2 wird der Barcode bezüglich der Codegröße und der minimalen Strichbreiten und -abstände integriert.

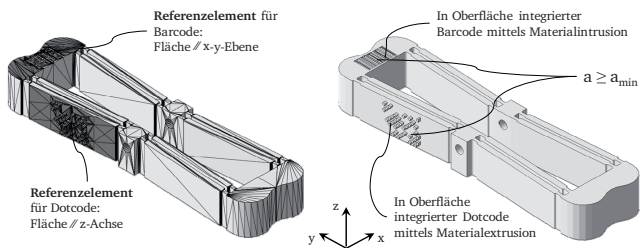


Abbildung 4-14: Beispiel Festkörpergelenk – oberflächenintegrierte Materialintrusion und -extrusion mit Dotcode (links) und Barcode (rechts) als Identifikatoren

Bei den drei folgenden Aktivitäten K₄ bis K₆ handelt es sich um Kennzeichnungs-träger, welche nur prozessintern also unternehmensintern beim Fertiger zu verwenden sind. Daher bestimmt der Fertiger selbst, welche Identifikationsart er auswählt. Je nach vorliegenden Identifikationssystemen und unternehmensspezifischen Anforderungen kann eine Identifikatorart ausgewählt werden. Für die Erläuterung der nachstehenden Aktivitäten K₄ bis K₆ wird als Identifikatorart die optische Kennzeichnung mittels OCR in Verbindung mit der oberflächenintegrierten Materialeextrusion verwendet. Die Integration der optisch auslesbaren Klarschrift erfolgt basierend auf den Gestaltungsrichtlinien I1.1 und I1.2. Hierdurch wird ein erfolgreiches Auslesen gewährleistet. Je nach Anwendungsfall können gemäß den aufgezeigten identifikationsgerechten Gestaltungsregeln andere Identifikatorarten integriert werden.

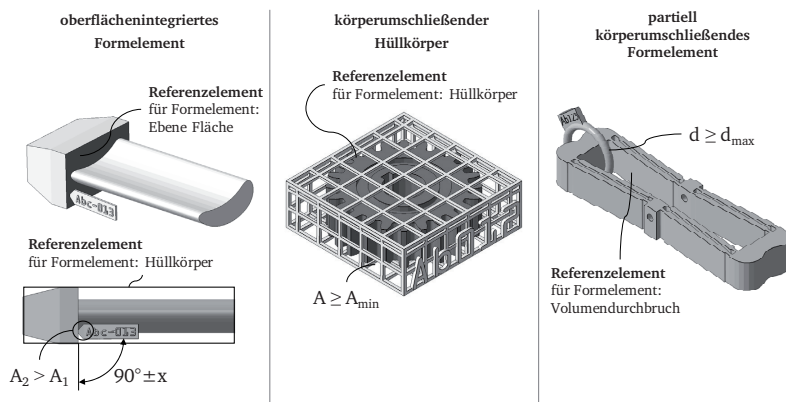


Abbildung 4-15: Beispiele – Kennzeichnungsträger K₄ an Turbinenschaukel (links), K₅ an Zahnrad (mittig) und K₆ an Festkörpergelenk (rechts) mit optischer Zeichenerkennung als Identifikator

Aktivität K₄ – Anbringung oberflächenintegriertes Formelement

Die anzubringenden Formelemente in Form eines Fähnchens sind als geometrische Templates hinterlegt und werden nach Definition der Referenzelemente am Bauteil samt Identifikator, hier der optisch auslesbaren Klarschrift, angebracht. Die Ausprägung des geometrischen Templates entspricht den Forderungen der Gestaltungsregel K3.2, wobei auf eine ausreichend große Fläche zur Anbringung der Klarschrift zu achten ist, siehe Gestaltungsregel K3.3. In einem ersten Schritt wird als Referenz die Boundingbox bzw. der Hüllkörper für das zu kennzeichnende Bauteil definiert. Ziel ist es, dass der Kennzeichnungsträger, wenn möglich, innerhalb dieser Boundingbox liegt, um platzsparend zu kennzeichnen. Anschließend wird gemäß der Gestaltungsregel K3.1 eine ebene Fläche als Referenzelement definiert. Die Anbringung des Formelements erfolgt demnach orthogonal zu dieser Referenzfläche. Abschließend wird das erzeugte oberflächenintegrierte Formelement inklusive des integrierten Identifikators mit der Bauteilgeometrie mittels booleschem Operator vereinigt. Abbildung 4-15 (links) zeigt beispielhaft diese Anbringung des Kennzeichnungsträgers oberflächenintegriertes Formelement samt der Identifikatorart OCR Schrift.

Aktivität K₅ – Anbringung körperumschließender Hüllkörper

Zur Anbringung eines körperumschließenden Hüllkörpers wird die bauteilindividuelle Boundingbox als Referenzelement benötigt. Die Bauteilgeometrie darf hier entsprechend der Gestaltungsregel K4.1 die maximal erlaubten Abmaße nicht übersteigen. Es ist dabei darauf zu achten, dass Mindestabstände zwischen Bauteil und generiertem Hüllkörper eingehalten werden, siehe Gestaltungsregel K4.3. Außerdem sollte der Hüllkörper eine gitterartige Struktur aufweisen, um eingeschlossenes Stützmaterial leichter zu entfernen und den Materialeinsatz für den Kennzeichnungsträger zu reduzieren. Dies wird durch Berücksichtigung der Gestaltungsregel K4.4 gewährleistet. Zur Integration der Identifikatorart, hier der Einbringung von Klarschrift, ist auf eine ausreichende Identifikatorfläche nach Gestaltungsregel K4.2 zu achten. Abbildung 4-15 (mittig) zeigt ein Beispiel für die Anbringung eines körperumschließenden Hüllkörpers unter Berücksichtigung der genannten Gestaltungsregeln. Für die Aktivität K₅ ist keine boolesche Operation notwendig, da Bauteilgeometrie und Hüllkörper zwei differente Flächenverbunde darstellen.

Aktivität K₆ – Anbringung partiell körperumschließendes Formelement

Das partiell körperumschließende Formelement benötigt als Referenzelement einen Volumendurchbruch in der Geometrie. Durch den Querschnitt des Volumendurchbruches wird das Formelement gemäß Gestaltungsregel K5.1 und K5.2 erzeugt. Dabei darf es im Querschnitt und hinsichtlich der neutralen Faser nicht die hinterlegten Werte überschreiten. Zur Anbringung des Identifikators wird zusätzlich im geometrischen Template eine ausreichend große Fläche berücksichtigt, vergleiche Gestaltungsregel K5.3. Analog zur Aktivität K6 wird kein boolescher Operator aus den oben genannten Gründen verwendet. Abbildung 4-15 (rechts) veranschaulicht die Anbringung des Kennzeichnungsträgers samt Identifikator beispielhaft.

Wie bereits zu Anfang des Kapitels beschrieben, soll theoretisch ermöglicht werden, dass der Kunde eine Kennzeichnungsfläche und/oder eine K-I-Kombination vorgibt, siehe Kundentyp 3 in Abschnitt 4.4. Die Methode prüft in diesem Fall nach oben beschriebener Logik die Machbarkeit unter Einbeziehung der K-I-Kombinationsmatrix und der Gestaltungsregeln dieser Anforderungen. Falls diese Kundenanforderungen nicht umsetzbar sind, wird gemäß dem vorgestellten Ablauf eine Alternative vorgeschlagen. Allerdings ist dieser Anwendungsfall nur der Vollständigkeit halber aufgeführt und nicht Bestandteil der Betrachtungen, wobei das Konzept diesen Fall ebenfalls bedienen kann. Voraussetzung hierfür ist lediglich das Bereitstellen einer Möglichkeit, diese Anforderungen des Kunden mit zu verarbeiten. Dies wird durch das Speichern einer Referenzfläche am Bauteil und/oder der gewünschten K-I-Kombination erreicht. Bei letzterem dezimiert sich die K-I-Kombinationsmatrix zu Anfang auf eine Zeile, wodurch direkt die Machbarkeit geprüft werden kann. Das Prüfen der vom Kunden gewünschten Kennzeichnungsfläche erfolgt durch die beschriebene Analyse der Bauteilgeometrie und unter Berücksichtigung der definierten Gestaltungsregeln.

4.5 Informationsmodell zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung

In den vergangenen Abschnitten wurde die Methode zur Kennzeichnung additiv zu fertigender Bauteile beschrieben. Neben den hier entwickelten Elementen und Bestandteilen des Prozessschrittes Bauteilkennzeichnung und den zugehörigen Aktivitäten liegen für die weiteren Prozessschritte der Prozesskette gleichermaßen

Elemente vor, siehe auch das Vier-Ebenen-Modell in Abbildung 4-2. Für die Verwendung der im gesamten Prozess anfallenden Elemente in rechnergestützten Systemen ist eine formale Beschreibung als Informationsmodell notwendig. In diesem Kapitel wird daher das Informationsmodell zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung entwickelt. Wie bereits in der konzeptionellen Vorgehensweise beschrieben, wird hier der Ansatz von ASHENHURST zur Informationsmodellierung gewählt [27]. Für ein eindeutiges Verständnis sollen nachstehend Definitionen der Begriffe Modell, Datenmodell und Informationsmodell aufgezeigt werden. Nach WÜSTNECK ist ein Modell wie folgt definiert:

„Ein Modell ist ein System, das als Repräsentant eines komplizierten Originals auf Grund mit diesem gemeinsamer, für eine bestimmte Aufgabe wesentlicher Eigenschaften von einem dritten System benutzt, ausgewählt oder geschaffen wird, um letzterem die Erfassung oder Beherrschung des Originals zu ermöglichen oder zu erleichtern, beziehungsweise um es zu ersetzen.“ [254]

Diese Definition entspricht der Auffassung von STACHOWIAK in seiner allgemeinen Modelltheorie [221]. In der Datenverarbeitung gehören zu den datenorientierten Modellbeschreibungen primär die Daten- und Informationsmodelle [250]. Basierend auf den Definitionen des Datenmodells nach ELMASRI *et. al* [94] und SAAKE [202] definiert WEITZMANN Datenmodell wie folgt:

„Ein Datenmodell ist ein Modell zur formalen Beschreibung aller zu verarbeitenden Daten und ihrer Beziehungen hinsichtlich des Datenformats als auch des Datentyps. Impliziter Bestandteil des Modells sind Operationen sowie Integritätsbedingungen, die auf die Daten angewendet werden können.“ [250]

Demgegenüber stellt das Informationsmodell prinzipiell eine Obermenge des Datenmodells hinsichtlich des Informationsgehaltes dar. Im Informationsmodell werden Objekte der realen Welt mit ihren Attributen und Funktionen formal beschrieben. Eine Detaillierung des Informationsmodells führt demnach zum Datenmodell [219]. Nach WEITZMANN ergibt sich folgende Definition für das Informationsmodell:

„Ein Informationsmodell dient der Formalisierung von Informationen, es verknüpft die abstrakten Attribute über semantische Beziehungen.“ [250]

Die Trennung von Daten und Funktionen wird in der Objektorientierung in einer gemeinsamen Klasse zusammengeführt. Die Daten werden in Form von Attributen und die Funktionen in Form von Operationen bzw. Methoden in der Klasse beschrieben [163]. Zur Beschreibung des Informationsmodells werden im Folgenden

UML-Klassendiagramme verwendet [181]. Sie erlauben das Abbilden von Attributen, Methoden bzw. Operationen sowie von Beziehungen zwischen Objekten.

In den folgenden Kapiteln werden die konzeptionell erarbeiteten Daten, Beziehungen und Aktivitäten in ein Informationsmodell überführt. Aufgrund der sehr komplexen und umfangreichen Beschreibung der Gesamthematik findet eine strukturelle Gliederung des Modells statt. Dementsprechend wird im nächsten Abschnitt vorab die Struktur des Informationsmodells beschrieben.

4.5.1 Struktur des Informationsmodells

Neben den formal abzubildenden Informationen, welche die Methode zur Bauteilkennzeichnung beinhaltet, wird diese Informationsmenge durch die anfallenden Informationen aus den weiteren Prozessschritten komplettiert. Zu diesen Prozessschritten zählen gemäß Abbildung 4-2 die Bauteilprüfung, Bauteilorientierung, Bauteilpositionierung, Schichtdatengenerierung, der In- und Post-Prozess sowie Informationen aus der Nutzung und dem Lebenszyklusende. Ergänzend zu diesen inhaltlichen Informationen bedarf es zusätzlicher Informationen, welche die Anwendbarkeit der Software-Applikation unterstützen. Der hierdurch entstehende Umfang und die vorliegende Komplexität erfordert eine Zerlegung des Informationsmodells in Partialmodelle, um eine ausschnittsweise Betrachtung zu erlauben [4; 223; 232]. Nach FELDHOUSE *et. al* wird für den vorliegenden Fall eine Unterteilung anhand von Funktionen durchgeführt [98]. Die Gesamtfunktion bzw. der Gesamtprozess wird zerlegt in mehrere Teilfunktionen bzw. Teilprozesse, wie in Abbildung 4-2 dargestellt. Die Unterteilung im Informationsmodell wird durch die Verwendung eines Kernmodells und differenter Partialmodelle umgesetzt.

Das Kernmodell bildet zentrale Informationen ab. Diese Informationen sind für alle Partialmodelle von Relevanz und werden über die Partialmodelle und das Kernmodell miteinander verbunden. Dabei ist die Struktur des Kernmodells statisch und informationstechnisch offen, dass eine spätere Änderung des Kernmodells nicht zwingend erforderlich ist [4]. Die Partialmodelle sind über definierte Schnittstellen mit dem Kernmodell verknüpft. Je nach Ausprägung sind die Partialmodelle auch direkt miteinander verbunden, um zusätzliche Informationen direkt auszutauschen. Diese direkten Verknüpfungen führen zu einem realitätsnahen Abbild des Gesamtmodells, da faktisch vorliegende Wechselwirkungen berücksichtigt werden [223]. Demnach lässt sich nach PÄTZOLD das Partialmodell wie folgt definieren:

„Ein Partialmodell definiert eine abgeschlossene Menge von Objekttypen sowie deren semantische Zusammenhänge als Teilmenge eines Produktmodells,

die eine anwendungsunabhängige Klasse von Produktmerkmalen beschreiben. Die Objektmengen der Partialmodelle sind disjunkt.“ [184]

Das Informationsmodell zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung besteht nach obigen Erläuterungen aus einem Kernmodell und acht Partialmodellen, siehe Abbildung 4-16.

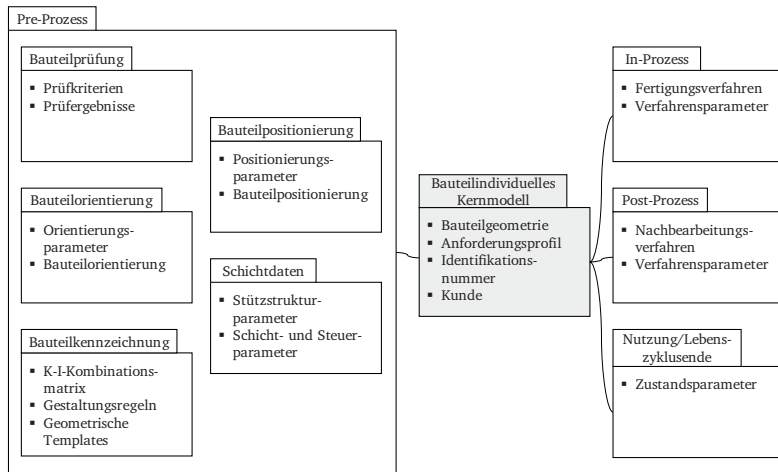


Abbildung 4-16: Struktur des Informationsmodells – schematisch

Durch Verwendung des UML-Paketdiagramms werden die einzelnen Modelle strukturiert. Die definierten Pakete des Informationsmodells sind das Kernmodell zur bauteilindividuellen Additiven Fertigung und die Partialmodelle Bauteilprüfung, Bauteilorientierung, Bauteilkennzeichnung, Bauteilpositionierung, Schichtdaten, In- und Post-Prozess sowie Nutzung und Lebenszyklusende. Die fünf Partialmodelle des Pre-Prozesses werden nochmals in einem Paket für den Pre-Prozess zusammengefasst dargestellt.

Im **Kernmodell** werden die Informationen zur Bauteilgeometrie und zum kunden-spezifischen Anforderungsprofil in Klassen abgebildet. Ferner sind Kundeninformationen und eine bauteilindividuelle Identifikationsnummer Bestandteil des Kernmodells.

Dem **Pre-Prozess** lassen sich fünf Partialmodelle zuordnen. Das **Partialmodell für die Bauteilprüfung** bildet die Prüfkriterien und Prüfergebnisse ab, welche während der Bauteilprüfung verwendet und erzeugt werden. Im **Partialmodell für die Bauteilorientierung** sind die gewählten Orientierungsparameter sowie die

optimierte Bauteilorientierung hinterlegt. Die zur Bauteilkennzeichnung erforderliche K-I-Kombinationsmatrix und die entwickelten Gestaltungsregeln werden im **Partialmodell für die Bauteilkennzeichnung** beschrieben und abgebildet. Hier sind ebenfalls Informationen zu den geometrischen Templates für die Kennzeichnungsträger enthalten. Das **Partialmodell für die Bauteilpositionierung** beinhaltet Informationen zu den gewählten Positionierungsparametern und beschreibt die gewählte Position des Bauteils. Das letzte Partialmodell im Pre-Prozess ist das **Partialmodell für die Schichtdatengenerierung**. Es bildet die Stützstruktur- sowie Schichtdatenparameter ab, die während des Prozessschrittes ermittelt werden.

Komplettiert wird das Informationsmodell durch die **Partialmodelle für den In-Prozess, den Post-Prozess** und für **die Nutzung bzw. das Lebenszyklusende**. Diese Partialmodelle repräsentieren Informationen zu den additiven Fertigungsverfahren samt gewählten Parametern, zu durchlaufenen Nachbearbeitungsverfahren inklusive deren eingestellten Parametern sowie Zustandsinformationen aus der Nutzung und dem Lebenszyklusende.

Die Partialmodelle beinhalten neben den allgemeingültigen Informationen auch kundenindividuelle und somit bauteilindividuelle Informationen. Das Kernmodell integriert die Information anhand der bauteilindividuellen Identifikationsnummer in die Partialmodelle. Hierdurch werden bauteilbezogenen Informationen generiert und der jeweiligen Identifikationsnummer zu geschrieben. Dies ermöglicht eine ganzheitliche Nachverfolgung und Dokumentation von bauteilindividuellen Informationen.

4.5.2 Kern des Informationsmodells

Das Ziel dieser Dissertation ist die Bereitstellung einer durchgängigen bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung. Hierfür bedarf es der Integration von Informationen aus den beteiligten Prozessschritten und -phasen in eine bauteilindividuelle Beschreibung. Für das bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Informationsmodell werden diese Informationen der einzelnen Partialmodelle über das Kernmodell integriert. Das Kernmodell beschreibt die vom Kunden gelieferte Bauteilgeometrie samt deren Transformationen und Aktualisierungen sowie das Anforderungsprofil. Der Kunde wird durch Metadaten repräsentiert und die eindeutige Identifikation eines Bauteils wird durch die bauteilindividuelle Vergabe einer Identifikationsnummer erreicht. Abbildung 4-17 zeigt das Klassendiagramm zum Kernmodell.

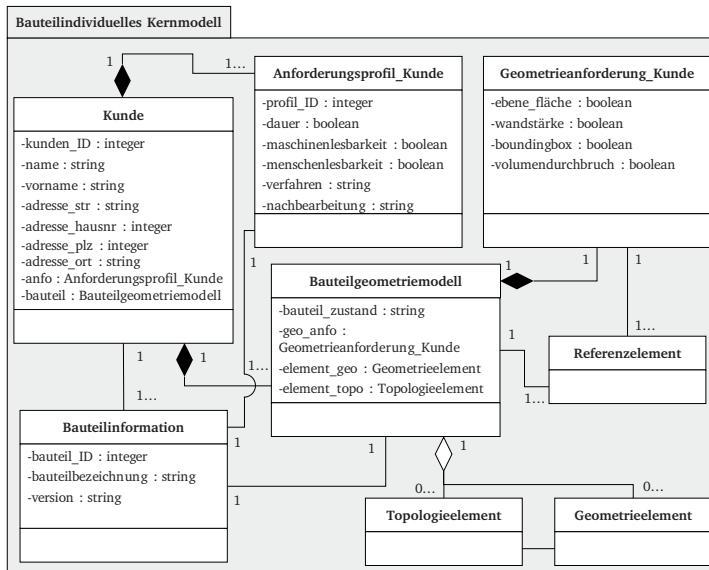


Abbildung 4-17: Bauteilindividuelles Kernmodell

Zentrales Element des Kernmodells ist die Klasse *Bauteilinformation*, sie besitzt die Attribute *bauteil_ID*, *bauteilbezeichnung* und *version*. Die *bauteil_ID* ermöglicht ein eindeutiges Identifizieren eines kundenindividuellen Bauteils. Jedem Bauteil sind dabei ein *Bauteilgeometriemodell* und ein Anforderungsprofil des Kunden zugeordnet. Dem Kunden können demgegenüber mehrere Bauteile, also auch mehrere bauteilindividuelle Informationen zugeordnet sein. Durch die Versionierung kann der Bauteilzustand je nach durchlaufenem Prozessschritt aktualisiert und versioniert werden. Dies ist beispielsweise dann notwendig, wenn das *Bauteilgeometriemodell* durch einen Prozessschritt modifiziert wurde. Somit spiegelt sich die Versionierung auch im *bauteil_zustand* der Klasse *Bauteilgeometriemodell* wieder. Die Klasse *Kunde* enthält alle Informationen zum Auftraggeber. Zur Durchführung des Gesamtprozesses der kundenindividuellen Additiven Fertigung wird die Klasse *Anforderungsprofil_Kunde* sowie das *Bauteilgeometriemodell* benötigt. In letzterer wird durch den *bauteil_zustand* die jeweilige prozessschrittspezifische Ausprägung des Bauteils beschrieben. Das Bauteilmodell besteht dabei aus *Topologie-* und *Geometrieelementen*. Zur Prüfung der Eignung einer Kennzeichnungskombination eines Bauteils bedarf es der Klasse *Geometrieanspruch_Kunde*, welche über notwendige *Referenzelemente* mit dem Bauteilgeometriemodell assoziiert ist. Über die

bauteil_ID der Klasse *Bauteilinformation* kann auf die Klassen des Kernmodells zugegriffen werden. Hierdurch werden durch vorhandene Assoziationen erforderliche Zugriffe auf beteiligte Partialmodelle initiiert. Mit jedem durchlaufenen Prozessschritt wird das bauteilindividuelle Kernmodell erweitert und das kundenindividuelle Bauteil hinsichtlich Gestalt und Informationsumfang modifiziert. Die Menge dieser Informationen kann nur durch eine rechnerbasierte Auswertung jener Informationen verarbeitet werden.

4.5.3 Partialmodelle im Pre-Prozess

Die Partialmodelle im Pre-Prozess bilden die prozessschrittspezifischen Informationen aus der Bauteilprüfung, Bauteilorientierung, Bauteilkennzeichnung, Bauteilpositionierung sowie der Stützstruktur- und Schichtdatengenerierung ab. Die Integration dieser Partialmodelle wird über das Kernmodell sowie den vorliegenden Assoziationen zwischen Elementen der Partialmodelle erreicht.

4.5.3.1 Partialmodell: Bauteilprüfung

Das Partialmodell der *Bauteilprüfung* bildet die Ergebnisse und Informationen des Prozessschrittes Bauteilprüfung formal ab, siehe Abbildung 4-18.

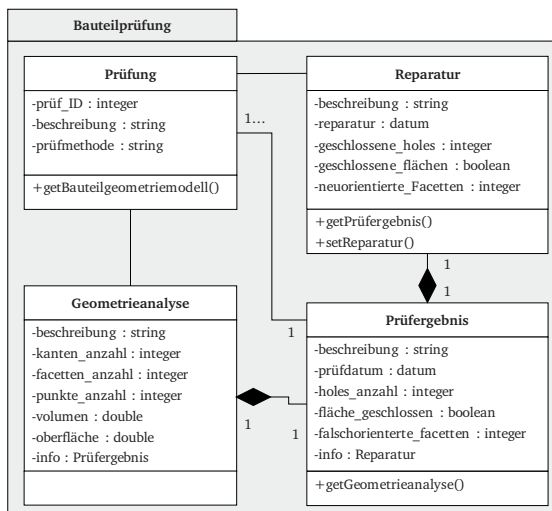


Abbildung 4-18: Partialmodell für die Bauteilprüfung

Das Partialmodell umfasst die Prüfung selbst, beschrieben durch eine *prüf_ID*, eine *beschreibung* sowie die gewählte *prüfmethode* und das resultierende *Prüfergebnis*.

Die Klasse *Prüfergebnis* wird durch die Attribute *beschreibung* sowie *prüfdatum* formal beschrieben. Das Bauteilindividuelle Prüfergebnis beinhaltet die Anzahl der in der Geometrie gefundenen Löcher in der Oberfläche (*holes_anzahl*) sowie falsch orientierte Flächennormalen (*falschorientierte_facetten*) in der Bauteilgeometrie-beschreibung. Darüber hinaus wird ermittelt ob die Bauteiloberfläche geschlossen ist (*fläche_geschlossen*). Das *Prüfergebnis* setzt die Verwendung der Klasse *Geometrieanalyse* voraus. Diese steht in Beziehung mit der Klasse *Prüfung* und greift darüber auf das *Bauteilgeometriemodell* zu. Es werden die Anzahl an Kanten (*kanten_anzahl*), Flächen (*flächen_anzahl*) und Punkten (*punkte_anzahl*) bestimmt. Ferner werden basierend auf dem Bauteilgeometriemodell das *volumen* und die *oberfläche* errechnet. Liegt ein negatives Prüfergebnis vor, ist also einer der Attributwerte zu *holes_anzahl* und *falschorientierte_facetten* ungleich Null oder der boolesche Wert für *fläche_geschlossen* gleich Null, so wird das Bauteilgeometriemodell repariert (Klasse *Reparatur*). Nach der Reparatur wird der modifizierte Zustand der *bauteil_ID* im Kernmodell zugeschrieben. Zur vollumfänglichen Nachverfolgung der getätigten Aktivitäten werden diese jeweils *beschrieben* und mit einem Durchführungsdatum (*datum*) versehen. Dies ermöglicht das Erzeugen eines bauteilindividuellen Prüf- und Reparaturberichtes.

4.5.3.2 Partialmodelle: Bauteilorientierung und -positionierung

Aufgrund der vorhandenen Analogie hinsichtlich formal abzubildenden Informationen zwischen Bauteilorientierung und -positionierung werden diese im vorliegenden Abschnitt zusammen beschrieben. Die beiden Partialmodelle sind in Abbildung 4-19 abgebildet. Die Partialmodelle *Bauteilorientierung* und *Bauteilpositionierung* benötigen zur Modifikation des Bauteils hinsichtlich der Rotation um und der Translation entlang der Koordinatenachsen das *Bauteilgeometriemodell* sowie zu wählende *Orientierungs-* bzw. *Positionierungsparameter*. Für die richtige Wahl der jeweiligen Parameter wird über das Kernmodell auf das Anforderungsprofil des Kunden (*Anforderungsprofil_Kunde*) zugegriffen. Die Parameter für die Bauteilorientierung bzw. -positionierung sind vom einzusetzenden additiven Fertigungsverfahren abhängig und stehen mit diesem in Assoziation. Diese Informationen werden ebenfalls über das Kernmodell aus dem *In-Prozess* in die Bauteilorientierung und -positionierung integriert. Bei der *Bauteilorientierung* entspricht das *Bauteilgeometriemodell* dem Zustand bzw. der Version des geprüften und reparierten Bauteilgeometriemodells. Die *Bauteilpositionierung* verarbeitet demgegenüber das *Bauteilgeometriemodell* im gekennzeichneten Zustand. Ergebnis der Bauteilorientierung und -positionierung ist das modifizierte Bauteilgeometriemodell, was jeweils über die Versionierung im Kernmodell abgelegt werden kann. Zusätzlich

werden für die Nachverfolgung des kundenindividuellen Bauteils die Werte der Rotationen um die x_{BT} -, y_{BT} - und z_{BT} -Achse bei der Orientierung formal beschrieben. Analog hierzu werden die Translationen entlang der Bauraumkoordinatenachsen x_{BR} , y_{BR} und z_{BR} in der Klasse *Bauteilpositionierung* definiert. Hierdurch kann die Orientierung des Bauteils selbst und die Lage im Bauraum verortet werden. Über die Methoden *setBauteilorientierung* und *setBauteilpositionierung* werden diese neuen Zustände definiert.

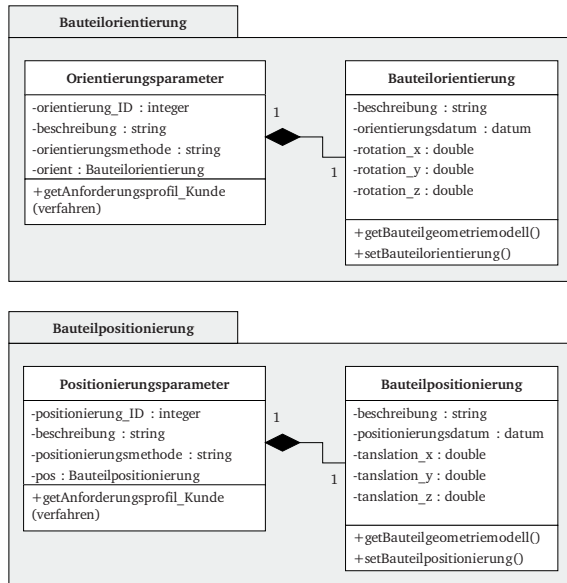


Abbildung 4-19: Partialmodell für die Bauteilorientierung und -positionierung

4.5.3.3 Partialmodell: Bauteilkennzeichnung

Das Partialmodell zur *Bauteilkennzeichnung* bildet die Formalisierung der entwickelten Methode zur Kennzeichnung von additiv zu fertigenden Bauteilen. Aufgrund der Komplexität der beschriebenen Methode ist dieses Partialmodell das umfangreichste, siehe Abbildung 4-20. Die Grundstruktur des Partialmodells gliedert sich im Wesentlichen in zwei Bereiche: zum einen in Klassen zur formalen Beschreibung der *Kennzeichnungskombinationsauswahl*, siehe erste Auswahlstufe der Methode; zum anderen definieren Klassen die *Kennzeichnungspositionierung*, siehe zweite Auswahlstufe der Methode.

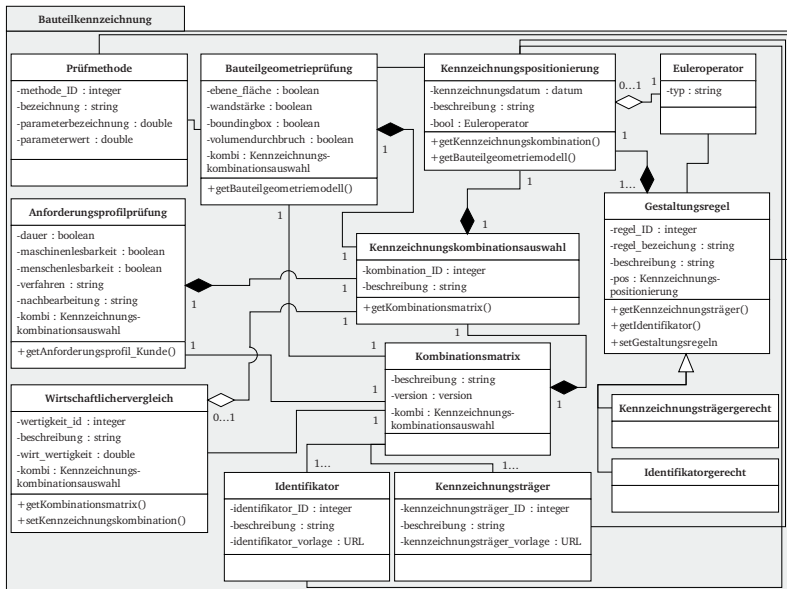


Abbildung 4-20: Partialmodell für die Bauteilkennzeichnung

Zur Definition der Kennzeichnungskombination sind stets Informationen zur *Kombinationsmatrix* erforderlich. Diese Matrix wird durch eine *beschreibung* und eine *version* als Attribut definiert. Für die Beschreibung der *Kombinationsmatrix* sind eine endliche Zahl an *Identifikatoren* und *Kennzeichnungsträgern* erforderlich. Daher sind diese beiden Klassen über eine Assoziation mit der Klasse *Kombinationsmatrix* verknüpft. Die Klassen *Identifikator* und *Kennzeichnungsträger* werden durch eine *ID* und eine *beschreibung* charakterisiert. Das Attribut *identifikator_vorlage* bzw. *kennzeichnungsträger_vorlage* verweist über den Wert *URL* auf die hinterlegte Vorlage bzw. auf das hinterlegte Template zu jenem Identifikator oder Kennzeichnungsträger. Diese Templates werden auch zur *Kennzeichnungsspositionierung* benötigt und sind daher mit dieser Klasse assoziiert. Neben der Klasse *Kombinationsmatrix* werden die formalen Beschreibungen für die einzelnen Abfragen zur Auswahl der Kennzeichnungskombination benötigt. Die Klasse *Anforderungsprofilprüfung* ruft über die Methode *getAnforderungsprofil_Kunde* das Kundenanforderungsprofil auf und gleicht die Einträge der *Kombinationsmatrix* mit denen des Anforderungsprofils des Kunden anhand der definierten Attribute ab. Die Attribute *dauer*, *maschinenlesbarkeit*, *mensenlesbarkeit*, *verfahren* und *nachbearbeitung* spiegeln die Informationen aus der entwickelten Methode wider. Nach Durchführung der *Anforderungsprofilprüfung* wird die *Kombinationsmatrix* höher

versioniert. Die Anfangsversion ist die universale Kombinationsmatrix, die nächste Version ist die bauteilindividuelle Kombinationsmatrix und die dritte Version ist die reduzierte bauteilindividuelle Kombinationsmatrix. Final wird die ausgewählte Kombination aus *Identifikator* und *Kennzeichnungsträger* an die Klasse *Kennzeichnungskombinationsauswahl* übergeben. Für die Version der reduzierten bauteilindividuellen Kombinationsmatrix prüft die Klasse *Bauteilgeometrieprüfung* das Bauteilgeometriemodell anhand von formal beschriebenen Prüfmethode(n) auf die Eignung des Bauteils hinsichtlich der Machbarkeit von Einträgen in der Kombinationsmatrix. Die Prüfergebnisse werden über formal beschreibbare Attribute ausgegeben. Sind die booleschen Operatoren der Attributwerte Null, so ist das Prüfkriterium nicht erfüllt. Zur ganzheitlichen Beschreibung des bauteilindividuellen Prozesses wird die Prüfmethode durch eine *ID*, *bezeichnung* sowie verwendete Prüfparameter (*parameterbezeichnung*) samt *parameterwerten* beschrieben. Wenn die Version der reduzierten bauteilindividuellen Kombinationsmatrix nach der Abfrage der Bauteilgeometrie mehr als einen Eintrag besitzt, wird auf die Klasse *Wirtschaftlichervergleich* zurückgegriffen. Über die formal abgelegten *wertigkeiten* wird ein relativer Vergleich durchgeführt und die derart ausgewählte *Kennzeichnungskombination* an die Klasse *Kennzeichnungskombinationsauswahl* weitergegeben.

Die Klasse *Kennzeichnungspositionierung* erfordert stets die Angabe von der ausgewählten *Kennzeichnungskombination*, der *Bauteilgeometrieprüfung* sowie der entwickelten *Gestaltungsregeln*. Deswegen werden diese zugehörigen Klassen im Partialmodell über Assoziationen miteinander verknüpft. Eine Gestaltungsregel wird durch eine *ID* samt *bezeichnung* sowie einer *beschreibung* definiert. Über die Methoden *getKennzeichnungsträger* und *getIdentifikator* wird auf Informationen und auf die Vorlagen bzw. Templates der Kennzeichnungsträger und Identifikatoren zugegriffen. Die Klasse *Gestaltungsregel* wird spezialisiert durch die Klassen *Kennzeichnungsträgergerecht* und *Identifikatorgerecht*, wobei die Attribute an diese vererbt werden. Die *Kennzeichnungspositionierung* ist aus Parametern und *Euleroperatoren* aufgebaut und manipuliert das Bauteilgeometriemodell.

4.5.3.4 Partialmodell: Stützstruktur und Schichtdaten

Das Partialmodell *Stützstruktur und Schichtdaten* formalisiert die Informationen aus dem letzten Prozessschritt im Pre-Prozess. In Abhängigkeit des additiven Fertigungsverfahrens wird dem positionierten Bauteilgeometriemodell eine *Stützstruktur* hinzugefügt. Hierzu sind verfahrensabhängige Stützstrukturparameter

essentiell. Diese werden durch eine *ID*, eine *beschreibung* und der *stützstrukturmethode* beschrieben. Letzteres Attribut beschreibt die geometrische Ausprägung der Stützstruktur und durch welche Algorithmen diese berechnet wird. Die Klasse *Stützstruktur* modifiziert das Bauteilgeometriemodell und ergänzt dieses durch die Methode *setStützstruktur*. Zur Durchführung des In-Prozesses werden in diesem Partialmodell die Steuerdaten formal beschrieben. Notwendig hierfür sind die verfahrensspezifischen *Schichtdatenparameter*. Durch eine *ID*, *beschreibung* sowie die gewählte *schichtdatenmethode* wird diese eindeutig deklariert. Die Ausprägung der Schichtdatenmethode kann beispielsweise das adaptive oder konventionelle Generieren der Schichtdaten sein. Das Attribut der *belichtungsstrategie* formalisiert die Information, welche Belichtungs- bzw. Füllstrategie für die Additive Fertigung gewählt wird und vorliegt. Beispielhafte Attributwerte sind parallel in x- oder y-Richtung, hexagonal oder diagonal. Die Steuerdaten werden zur Nachverfolgung mit einem *datum* sowie einer *beschreibung* spezifiziert. Der Steuercode bzw. die Steuerdaten werden bauteilindividuell über das Kernmodell integriert und können im In-Prozess weiterverarbeitet werden.

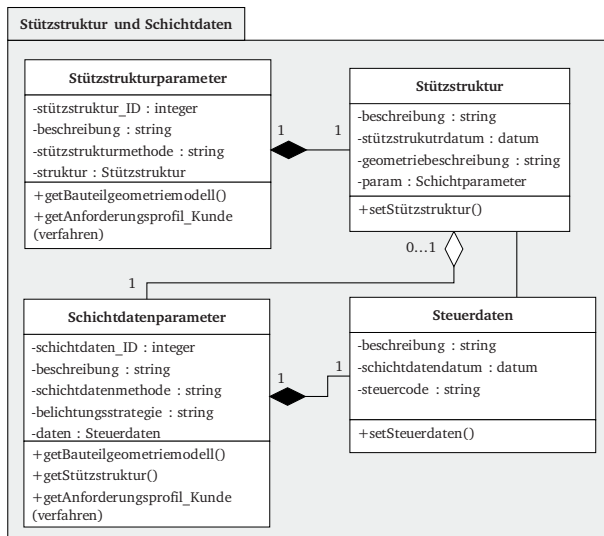


Abbildung 4-21: Partialmodell für Stützstruktur und Schichtdaten

4.5.4 Partialmodelle: In- und Post-Prozess sowie Nutzung und Lebenszyklusende

Nach Beendigung des Pre-Prozesses erfolgen die Prozess- bzw. Lebenszyklusphasen In-Prozess, Post-Prozess sowie die Nutzung und das Lebenszyklusende des Bauteils. In diesem Abschnitt werden die jeweiligen Partialmodelle hierzu beschrieben.

Zur Abbildung der additiven Fertigungsverfahren wird ein Partialmodell formuliert, siehe Abbildung 4-22. Die Klasse *Fertigungsverfahren* stellt die Verallgemeinerung der einzelnen additiven Fertigungsverfahren dar. Ein Fertigungsverfahren wird durch eine *ID* sowie einen *namen* definiert. Im vorliegenden Fall sind repräsentativ die additiven Fertigungsverfahren *Strangablegeverfahren*, *Kunststoff-Laser-Sintern* und *Laser-Strahlschmelzen* als Spezialisierung aufgeführt. Diese übernehmen die Attribute der Klasse *Fertigungsverfahren*. Durch die Methode *getAnforderungsprofil* wird das vom Kunden geforderte Fertigungsverfahren initiiert. Für das Fertigungsverfahren sind spezifische Fertigungsparameter erforderlich. Diese stehen in Assoziation mit der Klasse *Fertigungsverfahren* und werden durch eine *ID*, *parameterbezeichnung* und *beschreibung* definiert. Die hier gewählten verfahrensspezifischen Parameter werden bauteilindividuell über das Kernmodell integriert und stehen für die Nachverfolgung der Informationen in der Kernmodellklasse *Bauteilinformation* bereit.

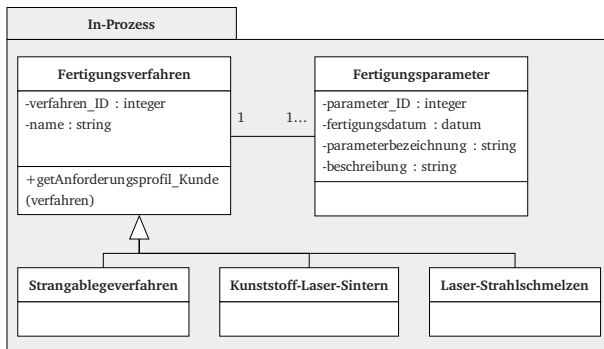


Abbildung 4-22: Partialmodell für den In-Prozess

Das Partialmodell zum *Post-Prozess* formalisiert analog zum In-Prozess die Informationen zur Nachbearbeitung additiv gefertigter Bauteile. Auch hier werden für die Nachbearbeitungsverfahren spezifische Nachbearbeitungsparameter benötigt. Diese werden durch eine *ID*, *bezeichnung* sowie durch eine *beschreibung* definiert.

Die Methode *getAnforderungsprofil_Kunde* der Klasse *Nachbearbeitungsverfahren* startet die Abfrage nach den erforderlichen Verfahren. Die Klasse *Verfahrensabhängigkeit* beinhaltet formale Informationen zu erforderlichen Verfahrenskombinationen. Wird beispielsweise vom Kunden das anwendungsspezifische Nachbearbeitungsverfahren *Strahlen* beim *Kunststoff-Laser-Sintern* ausgewählt, so werden durch eine in der Klasse *Verfahrensabhängigkeit* hinterlegte Liste erforderliche Verfahren identifiziert. Durch die Methode *setErforderlicheVerfahren* wird im Fall des genannten Beispiels das verfahrensspezifische Nachbearbeitungsverfahren *Druckluftreinigen* an die Klasse *Nachbearbeitungsverfahren* weitergegeben. Über diese werden die Parameter aus dem Post-Prozess zu den verfahrens- und anwendungsspezifischen Nachbearbeitungsverfahren über das Kernmodell integriert. Hierdurch wird eine durchgängige Informationsbereitstellung aus dem Post-Prozess heraus garantiert.

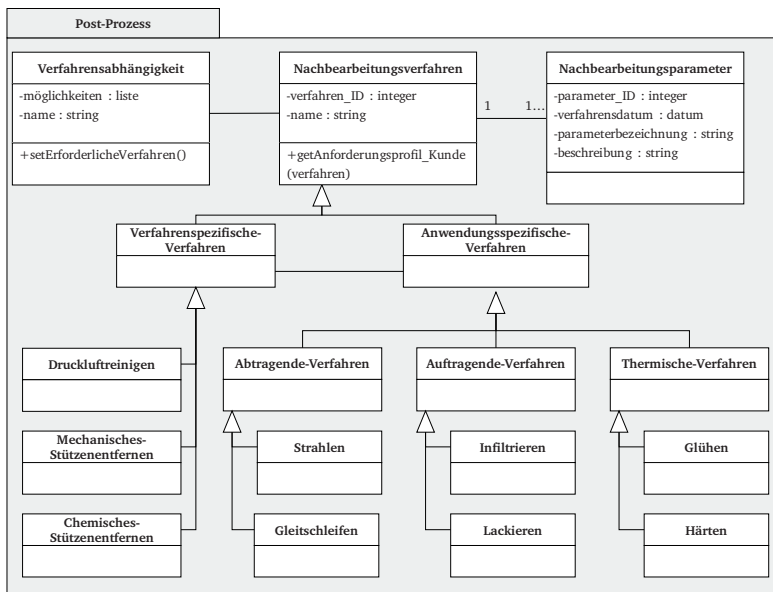


Abbildung 4-23: Partialmodell für den Post-Prozess

Der Vollständigkeit halber und zur Erreichung einer ganzheitlichen Betrachtungsweise werden im Partialmodell für die *Nutzung* und dem *Lebenszyklusende* hierin enthaltene Informationen formal beschrieben. Die Lebenszyklusphase wird durch eine *ID*, eine *bezeichnung* und eine *beschreibung* deklariert. Als Lebenszyklusphasen kommen die *Nutzung* sowie die *Wiederverwertung* und die *Entsorgung* des

Bauteils in Frage. Für den ganzheitlichen Ansatz der Nachverfolgung werden die einzelnen Phasen und vorliegenden Zustände über die Klasse *Zustandsparameter* beschrieben. In der Kernmodellklasse *Bauteilinformation* werden diese dann zentral verarbeitet und zur Identifikation und Nachverfolgung bereitgestellt.

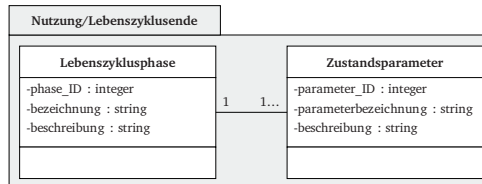


Abbildung 4-24: Partialmodell für die Nutzung und das Lebenszyklusende

4.5.5 Erweiterbarkeit des Informationsmodells

Das vorgestellte Informationsmodell kann um weitere Partialmodelle und Inhalte ergänzt werden. Dies wird durch den modularen Aufbau gewährleistet. Inhaltlich können beispielsweise weitere additive Fertigungsverfahren und/oder Nachbearbeitungsverfahren berücksichtigt und über das bauteilindividuelle Kernmodell integriert werden. Dies gilt gleichermaßen auch für die inhaltliche Erweiterung um Kennzeichnungsträger- und/oder Identifikatorarten. Ferner bietet der Aufbau des Informationsmodells die Möglichkeit, neu auftretende Prozessschritte samt deren Aktivitäten in Partialmodellen abzubilden und über das Kernmodell zu integrieren. Beispielsweise ist die Ergänzung der Prozesskette durch Arbeitsschritte zur Simulation denkbar. So könnten vor dem In-Prozess bauteilindividuelle Fertigungssimulationen durchgeführt werden. Die hier anfallenden und benötigten Informationen können in einem neuen Partialmodell abgebildet und im Informationsmodell integriert werden.

4.6 Bereitstellung einer durchgängigen Identifikation

Ein primäres Ziel dieser Dissertation ist die Nachverfolgung und Bereitstellung von bauteilindividuellen Informationen über den gesamten Prozess der bauteilindividuellen Additiven Fertigung hinweg. Aufbauend auf dem gezeigten Informationsmodell und der Prozesskette samt Aktivitäten zur bauteilindividuellen Additiven Fertigung wird dem Anwender ein Software-Applikation, bestehend aus Nachverfolgungs- und Assistenzsystem, zur Verfügung gestellt, siehe Abbildung 4-25.

Jedem Bauteil wird eine fortlaufende Identifikationsnummer vergeben. Diese dient als Referenzierung auf die in einer Datenbank abgelegten bauteilindividuellen Informationen, siehe Kapitel 5. Dieser einmalig vergebenen Identifikationsnummer werden alle Aktualisierungen und Modifizierungen zugeschrieben.

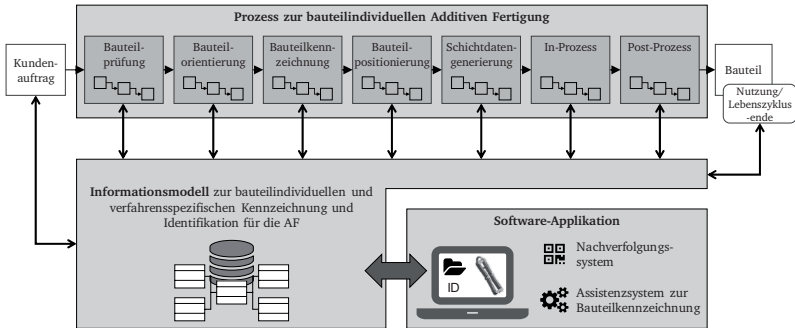


Abbildung 4-25: Integration der Software-Applikation in Gesamtkonzept

Wenn der Kunde eine Identifikationsnummer vorgibt wird diese intern in der Datenbank mitgeführt und auf die unternehmensinterne und einmalig vergebene Identifikationsnummer referenziert. Tabelle 4-8 zeigt beispielhaft die Referenzierung zwischen differenten Identifikationsnummern. In der ersten Spalte sind die vom System vergebenen fortlaufenden eindeutigen Identifikationsnummern eingetragen. Wenn beispielsweise der *Kunde A* eine eigene Identifikationsnummer (hier: A2017_45) benötigt und für die Additive Fertigung vorgibt wird diese der fortlaufenden unternehmensinternen ID zugeordnet (hier: 000.001). Hierdurch wird gewährleistet, dass die Bauteile jederzeit eindeutig identifiziert werden können. Wenn beispielsweise der *Kunde E* keine Identifikationsnummer vorgibt wird systemseitig ebenfalls mit der fortlaufenden ID (hier: 000.005) gearbeitet.

Tabelle 4-8: Referenzierung interner und kundenindividueller Identifikationsnummern

Unternehmensinterne ID	Kundenindividuelle ID	Kunde	Weitere Infos
000.001	A2017_45	Kunde A	...
000.002	-	Kunde B	...
000.003	Y201847	Kunde C	...
000.004	3456	Kunde D	...
000.005	-	Kunde E	...
...

Durch diese Referenzierung von unternehmensinterner und kundenindividueller Identifikationsnummer wird ermöglicht, dass der Kunde eigene Nummern im Anforderungsprofil für die Additive Fertigung angeben kann.

Das Informationsmodell integriert, wie beschrieben, die bauteilindividuellen Informationen aus den einzelnen Prozessschritten und Aktivitäten bzw. den zugehörigen Partialmodellen über das Kernmodell. Die Software-Applikation interagiert über definierte Schnittstellen mit dem Informationsmodell sowie hierüber mit der gesamten Prozesskette, wobei die Software-Applikation zwei Hauptfunktionalitäten bzw. -systeme zur Verfügung stellt. Dies umfasst zum einen die Identifikation und Nachverfolgung von kundenindividuellen Bauteilen anhand einer bauteilspezifischen Identifikationsnummer in Form eines Nachverfolgungssystems. Zum anderen kann der Mitarbeiter im Pre-Prozess auf ein Werkzeug zur Bauteilkennzeichnung in Form eines Assistenzsystems zurückgreifen. In welcher Form die Software-Applikation basierend auf den erarbeiteten Konzepten in diesem Kapitel implementiert wird, wird ausführlich in Kapitel 5 beschrieben. An dieser Stelle soll lediglich kurz auf Nutzen der Identifikation und Nachverfolgung konzeptionell eingegangen werden.

Die Informationsgewinnung in den physischen Phasen In- und Post-Prozess sowie der Nutzung und dem Lebenszyklusende erfordert Identifikationssysteme. Zur umfänglichen Beschreibung eines Bauteils bedarf es demnach dem physischen Auslesen und Identifizieren in eben diesen Phasen. Hierfür müssen die geeigneten Identifikationssysteme gemäß der ausgewählten Identifikatorart bereitgestellt werden. Wird eine K-I-Kombination gewählt, welche nur prozessintern bestand hält, also keine lebenslange Identifikation ermöglicht, so muss dem Kunden begleitend eine Identifikationsnummer vergeben werden. Dies kann durch die digitale oder physische Weitergabe eines Bauteilinformationsdokuments samt Identifikationsnummer erfolgen. Anhand dieses Begleitdokuments ist es dem Anwender möglich, jederzeit eine Abfrage der bauteilindividuellen Informationen zu starten. Der Identifikator ist demnach nicht mehr direkt auf dem Bauteil, sondern liegt in digitaler oder papierbasierter Form vor.

Die Suche nach einer bauteilindividuellen Identifikationsnummer ermöglicht dem Anwender den Zugriff auf alle relevanten Informationen. Basierend auf diesen Informationen ist es möglich, Wechselwirkungen von Bauteildefekten in der Nutzung und durchgeführten bauteilindividuellen Pre-, In- und Post-Prozessschritten aufzuzeigen. Ferner kann der Nutzer bauteilindividuell Energiebedarfe ableiten. Durch die auf das Bauteil heruntergebrochenen Steuerdaten kann beispielsweise der Energiebedarf des Lasers bauteilindividuell bestimmt werden. Weiter erlaubt

dies das Ermitteln von genauen bauteilindividuellen Kosten. Jeder Prozessschritt ist ausführlich dokumentiert, wodurch eine Pauschalkostenermittlung hinfällig wird.

4.7 Fazit

Ausgehend von dem in Kapitel 3 definierten Anforderungsprofil wurde in diesem Kapitel das Konzept zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung entwickelt und vorgestellt. Die Wahl der konzeptionellen Vorgehensweise, bestehend aus einem prozess- und aktivitätsorientierten Ansatz sowie dem Ansatz der Vorgehensweise bei der Informationsmodellierung, wurde durch die entwickelten Methoden und Ergebnisse positiv bestätigt. Hierdurch konnten ausgehend von einer angepassten und erweiterten Prozesskette samt entwickelter und eingebetteter Methode die relevanten Informationen erarbeitet werden. Durch die Formalisierung dieser wurde die Basis in Form des Informationsmodells für eine prototypische Implementierung und somit eine durchgängige Identifikation von additiv gefertigten Bauteilen ermöglicht.

Die Hauptbestandteile des Konzeptes bilden zum einen die Methode zur Bauteilkennzeichnung und zum anderen das Informationsmodell zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Additiven Fertigung. Durch die Entwicklung dieser beiden Konzeptbausteine wird eine durchgängige Identifikation ermöglicht. Ausgangspunkt für die Entwicklungen ist die Anpassung der Prozesskette zur bauteilindividuellen Additiven Fertigung. Diese wird durch den Prozessschritt der Bauteilkennzeichnung ergänzt.

Die Methode zur Bauteilkennzeichnung gliedert sich in zwei wesentliche Aktivitäten. In einem ersten Auswahlsschritt wird die für den vorliegenden Fall optimale Kombination aus Kennzeichnungsträger und Identifikator bestimmt. Die Bauteilkennzeichnung als Kombination aus einem Kennzeichnungsträger und Identifikator zu generieren, stellt einen neuen Ansatz im Bereich der Additiven Fertigung dar. Basis des ersten Auswahlsschrittes bildet die neuentwickelte K-I-Kombinationsmatrix. Diese dient als Wissensspeicher und zur Abfrage der technischen Machbarkeit von Kundenanforderungen und der zu fertigenden Bauteilgeometrie. In einem ersten Schritt wird basierend auf dem Anforderungsprofil eine bauteilindividuelle K-I-Kombinationsmatrix erstellt. Darauf aufbauend wird diese Matrix durch eine Geometrie- und Topologieabfrage weiter reduziert. Ergebnis des ersten Auswahlsschrittes der Methode ist die für den vorliegenden Anwendungsfall optimale Kombination aus Kennzeichnungsträger und Identifikator. Je nach Zustand

der Kombinationsmatrix wird dieses Ergebnis durch einen abschließenden relativen Vergleich der wirtschaftlichen Wertigkeit in Frage kommender Kombinationen erreicht.

Der zweite Arbeitsschritt der entwickelten Methode platziert die ausgewählte K-I-Kombination am orientierten Bauteilgeometriemodell. Für eine qualitätsgerechte Anbringung der Kombination am Bauteil dienen die entwickelten Gestaltungsrichtlinien. Die kennzeichnungsträger- und identifikatorgerechten Gestaltungsregeln gewährleisten ein sicheres Anbringen und Auslesen der Kombinationen während dem In- und Post-Prozess. Die Kennzeichnungsträger und Identifikatoren liegen selbst als geometrische Vorlagen bereit und sind gemäß den entwickelten Gestaltungsregeln definiert. Über boolesche Operatoren werden die Bauteile durch diese modifiziert und können an die Bauteilpositionierung weitergegeben werden.

Zur durchgängigen Verarbeitung von Informationen wurde ein bauteilindividueller Prozess formuliert, in dem die entwickelte Methode eingebettet ist. Durch die gewählte Top-Down-Vorgehensweise bei der Entwicklung konnten für alle beteiligten Prozessschritte notwendige Aktivitäten definiert und die hier vorliegenden Informationen beschrieben werden. Der gesamte Prozess ist dabei auf die Nutzung von datenverarbeitenden Systemen, welche in der Software-Applikation münden, ausgelegt. Für die rechnerinterne Abbildung werden formale Modelle aufgebaut. Durch die Formalisierung der vorliegenden Informationen, die aus dem Prozess resultieren, werden diese in ein Informationsmodell überführt. Aufgrund der Komplexität dieses und dem Anspruch auf Erweiterbarkeit besteht das Informationsmodell aus einem Kernmodell und verschiedenen Partialmodellen, wobei die bauteilindividuellen zentralen Informationen im Kernmodell abgebildet sind. Die Informationen aus den einzelnen Partialmodellen werden über das bauteilindividuelle Kernmodell integriert und können hierdurch über Schnittstellen und der Software-Applikation dem Anwender bedarfsgerecht zur Verfügung gestellt werden. Das Nachverfolgungssystem erlaubt dem Anwender anhand einer bauteilindividuellen Identifikationsnummer die Identifikation und Nachverfolgung von kundenindividuellen Bauteilen. Außerdem stellt die Software-Applikation ein rechnergestütztes Assistenzsystem zur Bauteilkennzeichnung im Pre-Prozess zur Verfügung. Das Informationsmodell stellt das Grundgerüst für die Implementierung dar. Im folgenden Kapitel wird eine prototypische Implementierung aufbauend auf den gezeigten Entwicklungen durchgeführt, dies beinhaltet insbesondere die Entwicklung der Software-Applikation.

5 Prototypische Implementierung

Das in dieser Dissertation entwickelte Konzept für eine bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung wird in diesem Kapitel prototypisch implementiert. Diese Implementierung umfasst die Entwicklung einer Software-Applikation zur Bereitstellung der beiden Kernfunktionalitäten der Identifikation und Nachverfolgung sowie der Bauteilkennzeichnung im Pre-Prozess. Die Software-Applikation umfasst somit ein Nachverfolgungssystem zur durchgängigen Identifikation von Bauteilen und ein Assistenzsystem zur Kennzeichnung von Bauteilen. Zu Anfang des Kapitels werden die Struktur und die enthaltenen Komponenten beschrieben. Darauf aufbauend wird die Implementierung der Elemente des Konzeptes in das Gesamtsystem erläutert.

5.1 Struktur der technischen Umsetzung

Ausgehend von den definierten Anforderungen an die Implementierung in Kapitel 3 wird eine Software-Applikation entwickelt. Diese Applikation stellt zum einen ein Nachverfolgungssystem für eine durchgängige bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Identifikation bereit. Zum anderen wird der Anwender in einem Assistenzsystem bei der Bauteilkennzeichnung unterstützt. Die entwickelte Software-Applikation *additiv-ID* besteht dabei aus drei wesentlichen Bestandteilen, siehe Abbildung 5-1. Die grafische **Benutzungsoberfläche** stellt dem Anwender die Interaktion mit einer der beiden Systemfunktionalitäten zur Verfügung:

- der **Identifikation und Nachverfolgung** zur prozessorientierten Darstellung der bauteilindividuellen Informationen anhand einer Bauteilidentifikationsnummer und
- der **Bauteilkennzeichnung** zur Auswahl und Anbringung einer bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kombination von Kennzeichnungsträger und Identifikator am zu fertigenden Bauteil.

Die zweite Funktionalität der Bauteilkennzeichnung erfordert die Einbindung eines domänenspezifischen Systems in die Software-Applikation. Daher wird hier eine **Datenschnittstelle** in der Applikation *additiv-ID* integriert. Die Wissensbasis des Assistenzsystems bildet das entwickelte **Informationsmodell** zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung. Die Speicherung und Verwaltung der instanziierten Objekte

des Informationsmodells erfolgt konsistent über eine **objektorientierte Datenbank**. Die beiden Anwendungsfunktionalitäten greifen für den Informationsaustausch auf diese Datenbank zu und aktualisieren diese anhand vorgegebener Bauteilidentifikationsnummer.

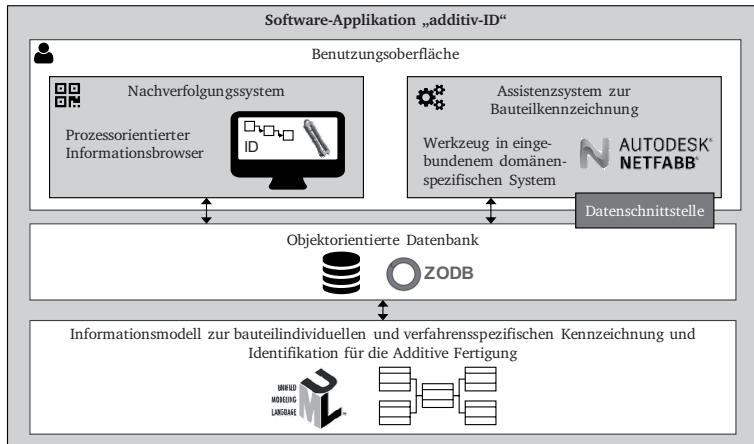


Abbildung 5-1: Überblick über die Struktur der technischen Umsetzung

Die Software-Applikation wird gemäß des Anforderungsprofils in Kapitel 3 möglichst unabhängig von bestehenden rechnergestützten Werkzeugen implementiert. Zur Integration notwendiger externer Programme in die Funktionalität der Bauteilkennzeichnung und den hier erforderlichen Informationsaustausch dient die Datenschnittstelle, siehe Abbildung 5-1. Hierüber können Informationen aus dem Informationsmodell ausgelesen und zurückgeführt werden.

Für die Programmierung der einzelnen Funktionen, insbesondere für die Bauteilprüfung und Teile der Bauteilkennzeichnung, wurde die Programmiersprache *Python 2.7* gewählt. *Python* unterstützt die objektorientierte Programmierung und stellt dabei ein offenes und gemeinschaftsbasiertes Entwicklungsmodell dar. Die Verwendung und programmiertechnische Anpassung von *Autodesk Netfabb* zur Bauteilkennzeichnung erfordert die Verwendung der Programmiersprache *Lua*, da *Autodesk Netfabb* nur für diese Programmiersprache eine Programmierschnittstelle zur Verfügung stellt. *Lua* ist eine erweiterbare Skriptsprache zur Einbindung in bestehende Programme. Die Gestaltung der Benutzeroberflächen und die Programmierung erfolgt in Entwicklungsumgebung *Microsoft Visual Studio 2017*. Diese Umgebung bietet eine umfassende Unterstützung bei der Programmierung und Fehlersuche sowie -behebung.

5.2 Benutzungsoberflächen

Die Benutzungsoberfläche stellt für den Anwender die beiden Kernfunktionalitäten der Software-Applikation zur Interaktion bereit. Der Anwender kann sich nach Starten des Systems für eine der beiden Funktionalitäten entscheiden, siehe die Schaltflächen in Abbildung 5-2. Je nach Auswahl wird der Anwender an eine der Funktionalitäten weitergeleitet.

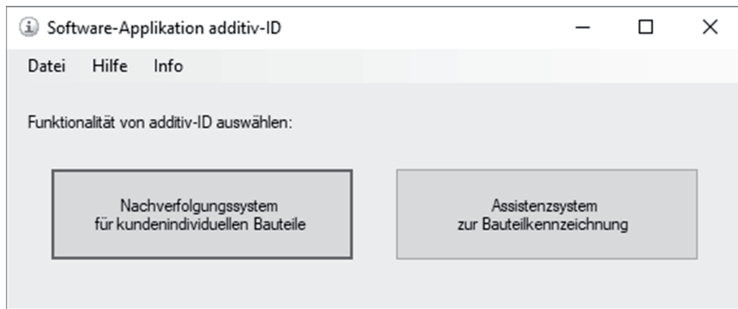


Abbildung 5-2: Benutzungsoberfläche zur Auswahl einer Funktionalität in der Software-Applikation additiv-ID

5.2.1 Prozessorientierter Informationsbrowser zur Identifikation und Nachverfolgung

Abbildung 5-3 zeigt die Benutzungsoberfläche zur Identifikation und Nachverfolgung von kundenindividuellen Bauteilen in Form eines prozessorientierten Informationsbrowsers. Im oberen Bereich des Fensters wird die Abfrage anhand einer einzugebenden Bauteil-ID gestartet (1). Dies kann, wie hier exemplarisch gezeigt, durch die Eingabe einer Identifikationsnummer geschehen oder durch die Verknüpfung einer Ausleseeinheit mit dem Nachverfolgungssystem. Nach systeminterner Abfrage und Auswertung dieser Identifikationsnummer kann der Anwender prozessorientiert Informationen zum Bauteil einsehen. Hierzu stehen Schaltflächen zu den einzelnen Prozessschritten bzw. -phasen im Nachverfolgungssystem zur Verfügung (2). Der Anwender kann sich Informationen zum Kundenauftrag, der Bauteilprüfung, der Bauteilorientierung, -kennzeichnung und -positionierung sowie zu Stützstrukturen und Schichtdaten anzeigen lassen. Darüber hinaus können Informationen zum In- und Post-Prozess sowie aus der Nutzung und dem Lebenszyklusende visualisiert werden.

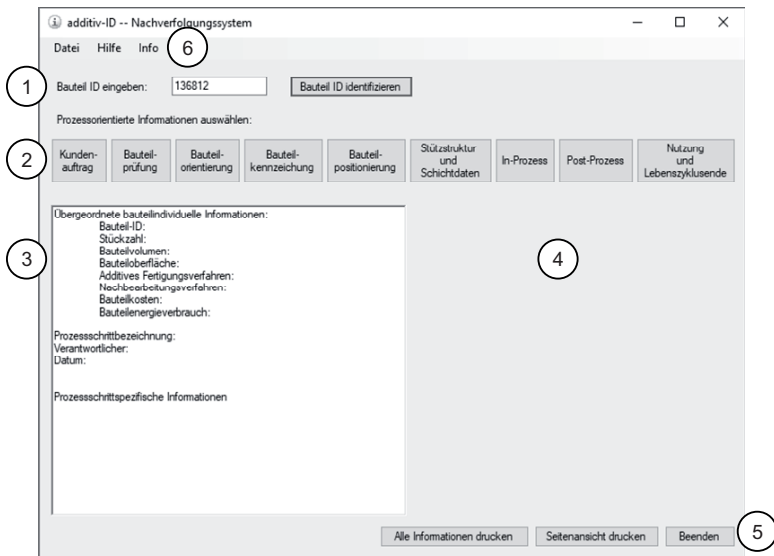


Abbildung 5-3: Benutzungsoberfläche zur Identifikation und Nachverfolgung von kundenindividuellen Bauteilen

Im unteren linken Teil der Benutzungsoberfläche werden dem Anwender alle vorhandenen prozessorientierten Informationen textuell angezeigt (3). Dies umfasst einen Informationskopf, in dem alle übergeordneten bauteilindividuellen Informationen enthalten sind. Hierzu zählen beispielsweise die Bauteil-ID, das Bauteilvolumen und die Bauteiloberfläche, das gewählte additive Fertigungsverfahren sowie Nachbearbeitungsverfahren, aber auch Informationen zu Bauteilkosten und dem bauteilindividuellen Energieverbrauch. Komplettiert werden diese Informationen durch die prozessschrittspezifischen Informationen. Diese differieren je nach gewählten Prozessschritt bzw. gewählter Prozessphase und spiegeln die im Informationsmodell formalisierten Informationen wider. Beispielsweise wird hier die ausgewählte Kennzeichnungsträger-Identifikator-Kombination bei dem Prozessschritt der Bauteilkennzeichnung angezeigt. Im unteren rechten Bereich werden dem Anwender grafische Informationen in Form von der modifizierten Bauteilgeometrie, eingesetzter Gestaltungsregeln oder dem gepackten Bauraum visualisiert (4). Über die Schaltflächen rechts unten im Informationsfenster kann der Anwender die gerade geöffneten oder alle zur Bauteil-ID vorhandenen Informationen drucken oder die Systemfunktion jederzeit beenden (5). Über die Menüleiste (6) können Bauteildateien zur Identifikation verwaltet, Informationen zum Nachverfolgungssystem und eine Hilfe zur Bedienung der Funktion geöffnet werden.

5.2.2 Rechnergestütztes Werkzeug zur Bauteilkennzeichnung

Zur Definition und zur geometrischen Abbildung der K-I-Kombination am Bauteil wird eine Software für den Pre-Prozess ausgewählt. Mithilfe dieser Software werden Bauteile für die Additive Fertigung im virtuellen Bauraum orientiert und positioniert, außerdem werden hier die notwendigen Schichtdaten erzeugt. Da die neudefinierte Bauteilkennzeichnung in der Prozesskette zwischen den beiden Aktivitäten der Bauteilorientierung und -positionierung integriert ist, bietet sich die Implementierung des Werkzeuges für die Bauteilkennzeichnung in eine Software für den Pre-Prozess an. Nach Analyse des Standes der Technik und bereits bestehender industrieller Umsetzungen in Kapitel 2 kommen zwei Softwareprogramme in Frage: *Materialise Magics* und *Autodesk Netfabb*. Hinsichtlich des Leistungsumfanges differenzieren sich diese beiden Programme nicht voneinander. Für die Integration des Werkzeuges zur Bauteilkennzeichnung ist eine Anpassung bzw. Erweiterung dieser Softwareprogramme erforderlich. Deswegen ist eine Programmierschnittstelle (API) zur Implementierung neuer Funktionalitäten und dem Informationsaustausch notwendig. Von den beiden genannten kommerziellen Programmen verfügt lediglich *Autodesk Netfabb* über eine entsprechende API. Daher wird für die Implementierung des Werkzeuges für die Bauteilkennzeichnung die Pre-Prozess-Software *Autodesk Netfabb*, in der Version *Ultimate 2018* verwendet. Abbildung 5-4 zeigt die Benutzungsoberfläche von *Autodesk Netfabb*. Die Benutzungsoberfläche von *Netfabb* gliedert sich im Wesentlichen in einen *Anzeigebereich*, eine *Menü- und Werkzeugleiste* sowie in den *Kontextbereich*. Im Kontextbereich werden alle Bauteile und Schichtendaten im *Projektbaum* aufgelistet. Durch diese Auflistung können Dateien organisiert und bestimmte Funktionen direkt an den Bauteilen oder Schichtdaten ausgeführt werden. Der *Anzeigebereich* visualisiert die Bauteile im *virtuellen Bauraum*.

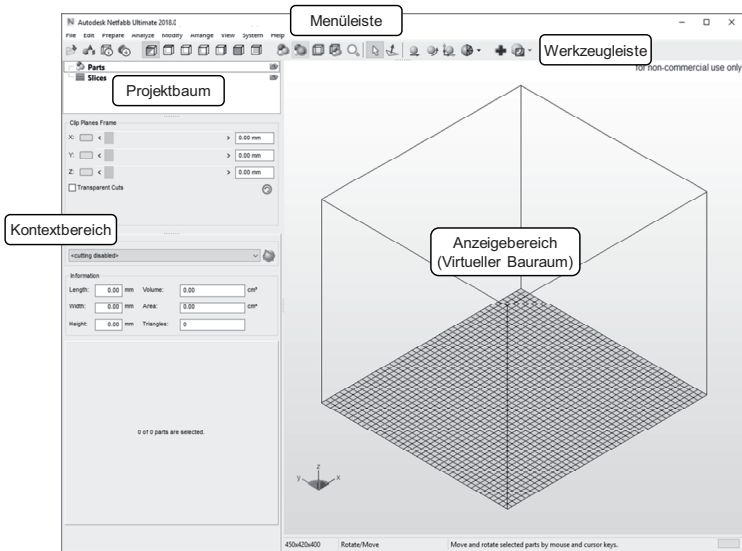


Abbildung 5-4: Benutzungsoberfläche Autodesk Netfabb Ultimate 2018

Wählt der Anwender gemäß Abbildung 5-2 die Funktionalität zur Bauteilkennzeichnung von kundenindividuellen Bauteilen aus, wird ihm die in Abbildung 5-5 dargestellte Benutzungsoberfläche angezeigt.

Analog zur Benutzungsoberfläche zur Identifikation und Nachverfolgung von kundenindividuellen Bauteilen beginnt die Bauteilkennzeichnung mit der Eingabe einer Bauteil-ID (7). Anschließend werden die orientierte Bauteilgeometrie in *Netfabb* geladen und dem Anwender das Anforderungsprofil des Kunden (8) sowie Informationen zum orientierten Bauteil (9) angezeigt. Letztere werden durch die Auswahl der K-I-Kombination erst noch ausgefüllt. Im unteren linken Bereich wird dem Anwender in der Benutzungsoberfläche zusätzlich das orientierte Bauteil visualisiert, hier beispielhaft dargestellt. Die Bauteilkennzeichnung erfordert wie konzeptionell erarbeitet als Steuergrößen die K-I-Kombinationsmatrix und kennzeichnungsträger- und identifikatorgerechte Gestaltungsregeln. Diese Steuergrößen können durch den Anwender hinsichtlich Inhalten und vorliegender Version eingesehen werden (10 und 11). Für die Verwendung der generellen Gestaltungsrichtlinien wird vom Anwender ein Parametersatz ausgewählt, hierdurch werden die hinterlegten Gestaltungsrichtlinien mit verfahrensspezifischen Werten versehen. Im unteren rechten Bereich können über Schaltflächen verschiedene Aktivi-

täten durchgeführt werden (12). So kann der Anwender lediglich eine K-I-Kombination vom Assistenzsystem auswählen lassen oder diese Auswahl direkt am Bauteil anbringen. Ferner können Modifizierungen zur Bauteil-ID gespeichert oder das Programm abgebrochen werden. Analog zur Identifikation und Nachverfolgung beinhaltet diese Benutzungsoberfläche ebenfalls eine Menüleiste (13).

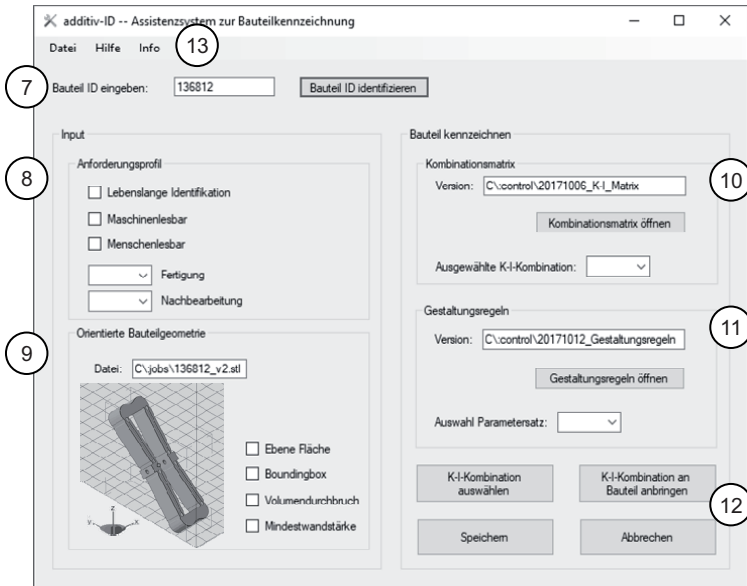


Abbildung 5-5: Benutzungsoberfläche des Assistenzsystems zur Bauteilkennzeichnung

Durch Auswahl der Schaltfläche *K-I-Kombination auswählen* setzt das Assistenzsystem die erste Stufe der entwickelten Methode um. Basierend auf dem Anforderungsprofil wird die bauteilindividuelle Kombinationsmatrix erzeugt und gespeichert. Anschließend wird das geöffnete orientierte Bauteil den beschriebenen geometrischen und topologischen Abfragen unterzogen. Die Ergebnisse werden im Bereich der Bauteilgeometrie (9) aktualisiert, hier durch Aktivierung der Check-boxen für den booleschen Wert *wahr*. Ergebnis ist die reduzierte bauteilindividuelle Matrix, welche wiederum über die Datenschnittstelle zur späteren Nachverfolgung abgespeichert wird. Für die Analyse der Boundingbox, der Volumendurchbrüche und Mindestwandstärken werden Standardfunktionen in *Netfabb* erweitert und bedarfsgerecht ausgelesen. Das Prüfen auf eine ebene Fläche mit ausreichen-

dem Flächeninhalt und passenden Proportionen erfordert die Programmierung eines zu integrierenden eigenständig funktionierenden Programms. Abbildung 5-6 stellt den Ablauf des Programms vereinfacht dar.

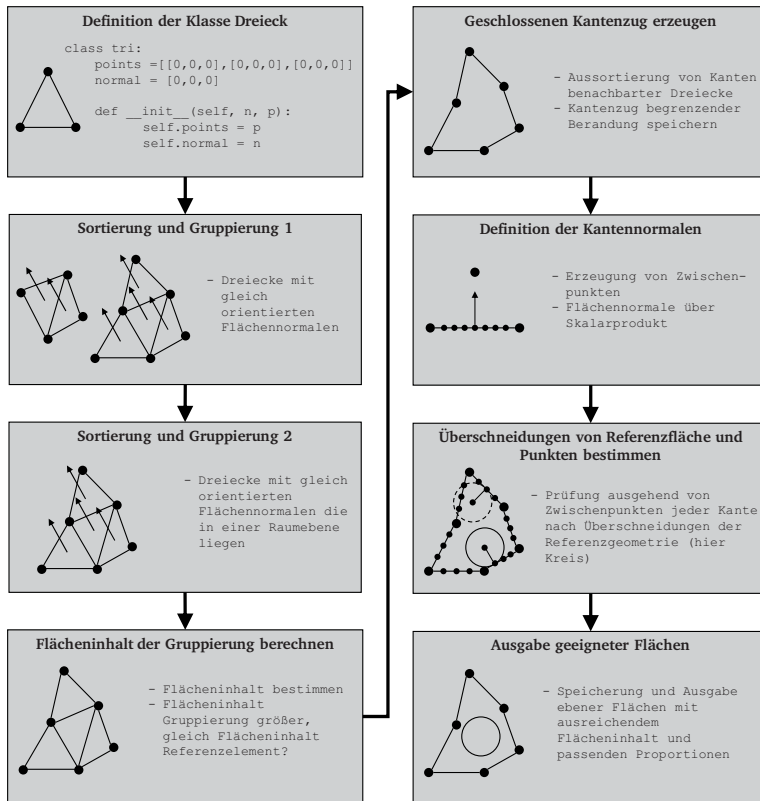


Abbildung 5-6: Programmablauf zur Prüfung auf ebene Flächen mit ausreichender Flächengröße und -proportion

Nach Beendigung der geometrischen und topologischen Analyse wird je nach Anzahl der übrig gebliebenen K-I-Kombinationen der relative wirtschaftliche Vergleich durchgeführt. Die Auswahl der Kombination endet mit der Aktualisierung und Speicherung der Informationen im Informationsmodell bzw. in der objektorientierten Datenbank. Dem Anwender wird die ausgewählte K-I-Kombination in der Benutzungsoberfläche zusätzlich angezeigt, siehe Abbildung 5-5 in Bereich (10).

Die Betätigung der Schaltfläche *K-I-Kombination an Bauteil anbringen* startet die Funktion zur entwickelten Methode. Die Bauteilgeometrie wird unter Berücksichtigung der entwickelten Gestaltungsregeln mit dem ausgewählten Kennzeichnungsansatz modifiziert. Je nach ausgewählter Kombination werden unterschiedliche geometrische Vorlagen verwendet und über boolesche Operatoren in *Netfabb* miteinander vereint oder voneinander subtrahiert. Abbildung 5-7 zeigt vereinfacht und anhand von Beispielen die Schritte zur Anbringung verschiedener geometrischer Vorlagen bzw. Templates für Kennzeichnungsträger und Identifikatoren samt Anwendung boolescher Operatoren.

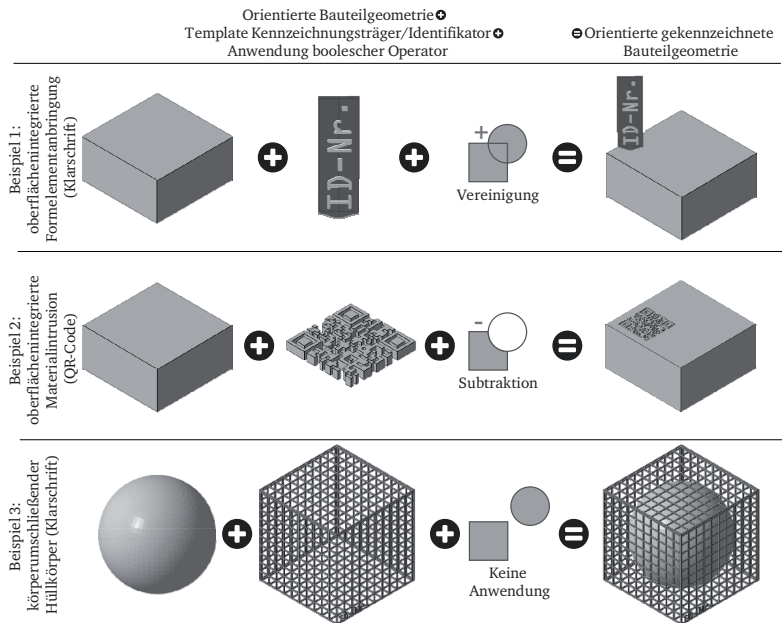


Abbildung 5-7: Schritte zur Anbringung der K-I-Kombination an der Bauteilgeometrie

Ist die ausgewählte K-I-Kombination nach obigen Vorgehen an die Bauteilgeometrie angebracht, werden diese Informationen aktualisiert und gespeichert.

5.3 Objektorientierte Datenbank

Für die Speicherung und Bereitstellung der instanziierten Objekte des Informationsmodells über die Laufzeit der erzeugenden Systeme hinaus wird eine konsistente Speicherung der Objekte benötigt. Hierfür wird eine Datenbank eingesetzt.

In dieser Datenbank sind ebenfalls die Kennzeichnungsträger-Identifikator-Kombinationsmatrix sowie die kennzeichnungsträger- und identifikatorgerechten Gestaltungsregeln abgelegt. Zur Speicherung dieser Informationen und Daten existieren relationale und objektrelationale Datenbanken. Zur Datenhaltung von objektorientierten Systemen, wie es hier der Fall ist, eignen sich jedoch objektorientierte Datenbanken am besten [222]. Der Vorteil liegt darin begründet, dass objektorientierte Datenbank Managementsysteme die Datenbankfunktionalitäten mit den Möglichkeiten der objektorientierten Programmierung vereinen. Die Verwendung von objektorientierten Datenbanken ermöglicht das Entwickeln von Klassen sowie die Speicherung, Vervielfältigung und Modifikation dieser Klassen als instanziierte Objekte in der Datenbank. Eine Gewährleistung der Konsistenz der Daten kann über ein gemeinsames Repräsentationsmodell gewährleistet werden. Dieser Vorteil wird durch die enge Verknüpfung von objektorientierter Datenbank und Programmiersprache erreicht. Für die vorliegende Dissertation wird im Rahmen der Implementierung auf eine auf *Zope Object Database* (ZODB) basierende objektorientierte Datenbank zurückgegriffen. Diese Datenbank ermöglicht die Abbildung von *Python*-Objekten [260].

5.4 Datenschnittstelle

Wie bereits beschrieben, beinhaltet die Software-Applikation die Integration des Programms *Autodesk Netfabb* sowie des Programms zur Prüfung ebener Flächen mit vorhandener Mindestgröße zur Bauteilkennzeichnung im Pre-Prozess. Diese domänenspezifischen Systemintegrationen erfordern eine Informationsschnittstelle zum bidirektionalen Austausch von Informationen. Für die Bereitstellung und Rückführung von prozessschrittrelevanten Informationen in das Informationsmodell werden hier XML (Extensible Markup Language) -Dateien verwendet. XML ist eine Auszeichnungssprache zur Darstellung hierarchisch strukturierter Daten in Textdateien. XML-Dateien ermöglichen einen plattform- und implementierungsunabhängigen Austausch von Daten [146]. Für die Implementierung werden XML-Dateien zum Austausch zwischen *Autodesk Netfabb* und der Software-Applikation *additiv-ID* verwendet.

Abbildung 5-8 zeigt beispielhaft eine XML-Austauschdatei. Hier wird das Ergebnis der generellen Bauteilanalyse in einem XML-Dokument abgebildet. Die XML-Struktur entspricht den Elementen und Attributen aus dem Partialmodell zur Bauteilprüfung. Das XML-Dokument enthält neben der eindeutigen Bauteil-ID (*bauteil_ID*) die Maße der Boundingbox (*boundingbox*) sowie die basierend auf der

STL-Datei errechnete Größe der Bauteiloberfläche (*area*). Weiterhin wird das Volumen (*volume*) der Bauteilgeometrie in der XML-Datei übergeben. Komplettiert wird das Dokument durch Angabe der Anzahl von Flächendreiecken (*triangles*), Kanten (*edges*) und Punkten (*points*). Diese Informationen dienen der Funktionalität zur Bauteilkennzeichnung als wichtige Eingangsgrößen.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<generelle bauteilanalyse>
  <bauteil_ID>136182</bauteil_ID>
  <boundingbox>
    <x>25.000</x>
    <y>97.333</y>
    <z>12.000</z>
  </boundingbox>
  <area>11137.480</area>
  <volume>11990.096</volume>
  <triangles>2552</triangles>
  <edges>3828</edges>
  <points>1264</points>
</generelle bauteilanalyse>
```

Abbildung 5-8: Beispiel einer XML-Austauschdatei der Bauteilkennzeichnung

5.5 Fazit

Im Rahmen der Implementierung ist die Software-Applikation *additiv-ID* prototypisch umgesetzt worden. Die Applikation *additiv-ID* ermöglicht über ein Nachverfolgungssystem die Nachverfolgung und Identifikation von kundenindividuellen Bauteilinformationen über einen Informationsbrowser. Eine weitere Funktionalität stellt die Bauteilkennzeichnung in Form eines Assistenzsystems dar. Das Assistenzsystem in der Applikation *additiv-ID* assistiert den Anwender bei der Anbringung der vom System ausgewählten K-I-Kombination an die Bauteilgeometrie.

Die gezeigten Benutzungsoberflächen dienen zur Interaktion für den Anwender mit der Software-Applikation. Die Aktualisierung und Bereitstellung von relevanten Informationen erfolgt durch für den Benutzer verborgene Hintergrundprozesse. Hierfür wird aufbauend auf dem entwickelten Informationsmodell eine objektorientierte Datenbank eingesetzt. Die Auswahl der bauteilindividuellen K-I-Kombination erfolgt durch Algorithmen, welche auf den entwickelten Konzepten aufsetzen. Durch die Integration von *Autodesk Netfabb* in die Funktionalität der Bauteilkennzeichnung ist eine Datenschnittstelle notwendig. Der Datenaustausch findet mittels XML-Dateien statt. Durch die Programmierschnittstelle in *Autodesk*

Netfabb konnten einzelne Abfragen angepasst oder neu entwickelt werden. Hierdurch wird dem Anwender ein rechnergestütztes Werkzeug zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung zur Verfügung gestellt.

Durch die Implementierung des Nachverfolgungssystems wird eine eindeutige und korrekte Identifikation von kundenindividuellen Bauteilen erreicht. Durch die Verwendung der konzeptionierten Referenzierung von internen Identifikationsnummern zu kundenindividuellen Identifikationsnummern können unterschiedliche Nummernsysteme verarbeitet werden. Die fortlaufende Identifikationsnummer stellt die interne ID dar, durch die in der Datenbank vorhandene Verlinkung auf die kundenindividuelle ID wird eine Eindeutigkeit und somit durchgängige Nachverfolgung der Bauteile erreicht.

6 Validierung und Verifikation

Aufbauend auf dem entwickelten Konzept und der gezeigten Implementierung im letzten Kapitel wird in den folgenden Abschnitten die Tragfähigkeit des Konzeptes und die Funktionalität der prototypischen Implementierung geprüft. Hierfür werden im Folgenden repräsentative Beispiele ausgewählt. Ferner werden die Steuergrößen universale K-I-Kombinationsmatrix und die generell formulierten Gestaltungsregeln mit spezifischen Werten versehen. Die eigentliche Validierung umfasst die Durchführung der Funktionalitäten *K-I-Kombination auswählen und an Bauteil anbringen* und *bauteilindividuelle Informationen identifizieren und nachverfolgen*. Im Anschluss an die Validierung findet die Verifikation statt. Diese Verifikation umfasst nach VDI 2206 die Überprüfung der Übereinstimmung zwischen Softwareprodukt und seiner Spezifikation, hier dem Anforderungsprofil aus Kapitel 3 [237]. Demgegenüber steht die Validierung, hier wird die Eignung bzw. der Wert eines Produktes bezogen auf seinen Einsatzzweck verstanden [34; 237].

6.1 Auswahl repräsentativer Beispiele

Zur Validierung sollen zwei repräsentative Beispiele dienen. Die Beispiele setzen sich jeweils aus einem Kundentyp mit Anforderungsprofil und einer zu fertigenden Bauteilgeometrie zusammen. Hier wird auf die beiden beschriebenen Kundentypen 1 und 2 aus Kapitel 4.4 zurückgegriffen.

Kundentyp 1 benötigt selbst keine Kennzeichnung für das zu fertigende Festkörpergelenk, siehe Anforderungsprofil in Abbildung 6-1. Daher entscheidet der Fertiger selbst, welche Anforderungen er an die Identifikation stellt. Für den vorliegenden Fall fordert er eine Identifikatorart, die menschenlesbar ist. Dieser Kundentyp wählt das Strangablegeverfahren als additives Fertigungsverfahren aus. Als Nachbearbeitungsverfahren ist im Anforderungsprofil das Lackieren des Bauteils (NBV7) angegeben.

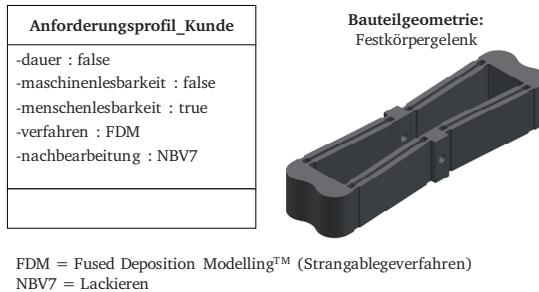


Abbildung 6-1: Kundentyp 1 – Anforderungsprofil und Bauteilgeometrie

Der zweite Kundentyp stellt gemäß Abbildung 6-2 die Anforderung an eine lebenslange Identifikation über den unternehmensinternen Prozess hinaus. Ferner soll der Identifikator maschinenlesbar und nicht menschenlesbar sein. Als additives Fertigungsverfahren soll das Kunststoff-Laser-Sintern verwendet werden. Gefolgt vom Gleitschleifen (NBV5) im Post-Prozess. Das zu fertigende Bauteil ist eine vereinfachte Turbinenschaufel, siehe Abbildung 6-2.

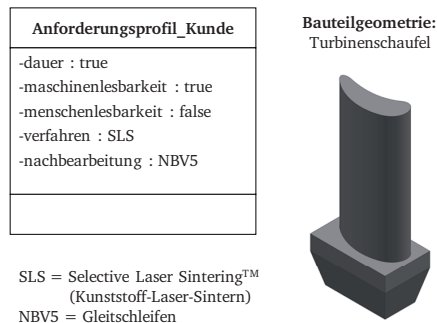


Abbildung 6-2: Kundentyp 2 – Anforderungsprofil und Bauteilgeometrie

Ziel ist es, in der folgenden Validierung die Differenzen der beiden Kundentypen in der Auswahl und Anbringung einer K-I-Kombination an der Bauteilgeometrie herauszuarbeiten. Für die Funktionalität der Identifikation und Nachverfolgung wird zur Veranschaulichung und Validierung lediglich ein Kundentyp verwendet.

6.2 Verwendete Steuergrößen

Die Durchführung der beiden Funktionalitäten in der Software-Applikation beruht auf den entwickelten Methoden und Konzepten. Für die Durchführung und Implementierung der Methode zur Kennzeichnung von additiv zu fertigenden Bauteilen werden Steuergrößen benötigt, vergleiche Abbildung 4-3. Diese beiden Steuergrößen sind zum einen die universale K-I-Kombinationsmatrix und zum anderen die entwickelten generellen Gestaltungsregeln. Zur Durchführung des Systemtests werden diese hier mit spezifischen Werten versehen.

6.2.1 K-I-Kombinationsmatrix

Für die Implementierung ist die K-I-Kombinationsmatrix von essentieller Bedeutung. In diesem Abschnitt werden für diese die Attributwerte hergeleitet und in der universalen K-I-Kombinationsmatrix festgehalten. Diese bildet wiederum die Basis für die Analyse des Anforderungsprofils und der Bauteilgeometrie und führt somit zur reduzierten bauteilindividuellen K-I-Kombinationsmatrix.

Basierend auf dem analysierten Stand der Technik werden folgende repräsentative Kennzeichnungsträger K_i und Identifikatorarten I_j zur Bildung von Kombinationen und Bestimmung derer Attributwerte untersucht.

Kennzeichnungsträger K_i :

K_1 : volumenintegrierte Hohlraumeinbringung

K_2 : oberflächenintegrierte Materialintrusion (Subtraktion)

K_3 : oberflächenintegrierte Materialextrusion (Addition)

K_4 : oberflächenintegrierte Formelementanbringung (Flächenanbau)

K_5 : körperumschließender Hüllkörper

K_6 : partiell körperumschließendes Formelement

Identifikatorart I_j :

I_1 : optische Zeichenerkennung (OCR)

I_2 : Barcode – EAN-Code 128

I_3 : Matrixcode – Dotcode A

I_4 : Matrixcode – QR-Code

I_5 : RFID-/NFC-Technologie

Aus dieser Auswahl geeigneter Kennzeichnungsträger und Identifikatorarten lassen sich gemäß nachstehender Berechnung theoretisch 30 Kombinationen bilden.

$$m \cdot n = \text{Anzahl möglicher Kombinationen}$$

$$\text{bei } K_i I_j \text{ mit } i = 1, \dots, m \text{ und } j = 1, \dots, n$$

Technisch betrachtet können vorab bereits Kombinationen ausgeschlossen werden. Dies betrifft die Verwendung der Identifikatorart I_5 *RFID-/NFC-Technologie*. Gemäß den gestellten Anforderungen an die Methode sollen keine zusätzlichen Prozessschritte in den Gesamtprozess integriert werden. Um dies zu erreichen, findet die Kombination der RFID-/NFC-Technologie nur prozessintegriert in Form der volumenintegrierten Hohlraumeinbringung während der Fertigung statt. Ferner ist es nicht möglich RFID- oder NFC-Transponder durch die Kennzeichnungsträger Materialintrusion oder -extrusion dem Bauteil hinzuzufügen. Auch die Verwendung von kostenintensiven Transpondern nur innerhalb der Fertigung schließt eine Kombination mit den Kennzeichnungsträgern *Hüllkörper* sowie *partiell umschließendes Formelement* aus. Nach Ausschluss dieser Kombinationen werden für 25 K-I-Kombinationen die Attributwerte bestimmt.

Tabelle 6-1 zeigt aus Gründen der Übersichtlichkeit einen repräsentativen Auszug der ausgefüllten universalen K-I-Kombinationsmatrix. Die gesamte ausgefüllte universale K-I-Kombinationsmatrix ist dem Anhang zu entnehmen, siehe Tabelle 10-2. Die Ermittlung der Attributwerte basiert dabei auf unterschiedlichen Informationsquellen. Zum einen entstammen diese durchgeführten Tests für Kombinationen, die mittels Strangablegeverfahren und Kunststoff-Laser-Sintern gefertigt wurden [31; 46]. Zum anderen beruhen die Attributwerte auf dem analysierten Stand der Technik und Forschung. Im Anhang wird die Wahl der Attributwerte begründet.

Tabelle 6-1: Universale K-I-Kombinationsmatrix inklusive Attributwerte – Auszug

A _k K _i I _j	Attribute aus...									
	kundenindividuellem Anforderungsprofil					Bauteilgeometrie				Aufwand
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀
K ₁ I ₅	1	1	0	FDM	NBV1; NBV3; NBV4; NBV5; NBV7	1	1	0	0	0,5625
K ₅ I ₁	0	1	1	FDM SLS SLM	NBV2; NBV6; NBV8; NBV9	0	0	1	0	0,375
K ₆ I ₂	0	1	0	FDM SLS	NBV1 bis NBV9	0	0	0	1	0,313
K _m I _n	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Legende: K_iI_j = Kombination aus Kennzeichnungsträger K_i und Identifikatorart I_j; A_k = Attribut; A₁₀ (K_{F,i,j}) = wirtschaftliche Wertigkeit; FDM = Fused Deposition ModellingTM (Strangablegeverfahren); SLS = Selektives LasersinternTM (Kunststoff-Laser-Sintern); SLM = Selective Laser MeltingTM (Laser-Strahlschmelzen); NBV = Nachbearbeitungsverfahren; A₁ = Lebenslanges Auslesen; A₂ = Maschinenlesbarkeit; A₃ = Menschenlesbarkeit; A₄ = Additives fertigungsverfahren; A₅ = NBV; A₆ = ebene Fläche vorhanden; A₇ = ausreichende Wandstärke vorhanden; A₈ = Boundingbox möglich; A₉ = Volumendurchbruch vorhanden; K₁ : volumenintegrierte Hohlraumeinbringung; K₅ : körperumschließender Hüllkörper; K₆ : partiell körperumschließendes Formelement ; I₁ : optische Zeichenerkennung (OCR); I₂ : Barcode – EAN-Code 128; I₅ : RFID-/NFC-Technologie

6.2.2 Spezifische Gestaltungsregeln

Für die Verwendung der generell formulierten Gestaltungsregeln müssen diese für die Durchführung der Validierung ebenfalls mit spezifischen Werten versehen

werden. Die Vergabe dieser Werte, siehe Tabelle 6-2, beruht auf aktueller Literatur, Anlagenparametern sowie bereits bestehenden Gestaltungsrichtlinien zur Additiven Fertigung [6; 7]. Die Nummerierungen der kennzeichnungsträger- und identifikatorgerechten Gestaltungsregeln referenzieren auf die Auflistung dieser Regeln, siehe Tabelle 4-2 bis Tabelle 4-7. Aufgrund dessen, dass die beiden Kundentypen das Strangablegeverfahren (FDM) und das Kunststoff-Laser-Sintern (SLS) als additives Fertigungsverfahren gewählt haben, werden auch nur für diese beiden Verfahren exemplarisch Werte für die Validierung vergeben.

Tabelle 6-2: Spezifische Gestaltungsregeln zur Validierung (fortlaufend)

Re-gelnr.	Betrifft	Bezogen auf	Abmaße für	
			FDM	SLS
K1.1	Volumenintegrierte Hohlraumeinbringung	Größe des Hohlraumes	$b_{\max} = 18,5 \text{ mm};$ $h_{\max} = 18,5 \text{ mm};$ $t_{\max} = 0,7 \text{ mm}$	$b_{\max} = 15,5 \text{ mm};$ $h_{\max} = 15,5 \text{ mm};$ $t_{\max} = 0,6 \text{ mm}$
K1.3	Volumenintegrierte Hohlraumeinbringung	Abstand zu Bauteiloberfläche	$a_{\min} = 1,0 \text{ mm}$	$a_{\min} = 1,4 \text{ mm}$
K2.1; K3.3; K4.2; K5.3	Oberflächenintegrierte Materialextusion/-intrusion; Oberflächenintegrierte Formelementanbringung; Körperumschließender Hüllkörper; Partiiell körperumschließendes Formelement	Größe des Formelementes	$b_{\min} = 20 \text{ mm};$ $h_{\min} = 20 \text{ mm};$ $t_{\min} = 1,2 \text{ mm}$	$b_{\min} = 18 \text{ mm};$ $h_{\min} = 18 \text{ mm};$ $t_{\min} = 1,0 \text{ mm}$
K2.3	Oberflächenintegrierte Materialextusion/-intrusion	Tiefe bzw. höhe der Intrusion/Extrusion	$a_{\min} = 1,2 \text{ mm}$	$a_{\min} = 1,0 \text{ mm}$
K4.1	Körperumschließender Hüllkörper	Abmessung des Hüllkörpers	$b_{\max} = 50 \text{ mm}; h_{\max} = 50 \text{ mm}; t_{\max} = 50 \text{ mm}$	
K4.3	Körperumschließender Hüllkörper	Abstände zu Hüllkörper	$a_{\min} = 2 \text{ mm}$	$a_{\min} = 4 \text{ mm}$
K4.4	Körperumschließender Hüllkörper	Ausführung des Hüllkörpers	$A_{\min} = 80 \text{ mm}^2$	$A_{\min} = 50 \text{ mm}^2$

Tabelle 6-2: Spezifische Gestaltungsregeln zur Validierung (fortlaufend)

Re-gelnr.	Betrifft	Bezogen auf	Abmaße für	
			FDM	SLS
K5.1	Partiell körperum-schließendes Formele-ment	Durchmesser des Formele-mentes	$d_{\max} = 6 \text{ mm}$	$d_{\max} = 5 \text{ mm}$
K5.2	Partiell körperum-schließendes Formele-ment	Länge des Formelelementes	$l_{\max} = 110 \text{ mm}$	$l_{\max} = 90 \text{ mm}$
I2.1; I3.1; I4.1	Barcode; Dotcode; QR-Code	Größe des Codes	$b_{\min} = 20 \text{ mm};$ $h_{\min} = 20 \text{ mm}$	$b_{\min} = 18 \text{ mm};$ $h_{\min} = 18 \text{ mm}$
I2.2	Barcode	Strichbreiten und -abstände	$l_{\min} = 0,7 \text{ mm};$ $s_{\min} = 0,7 \text{ mm}$	$l_{\min} = 0,5 \text{ mm};$ $s_{\min} = 0,5 \text{ mm}$
I3.2	Dotcode	Punktgröße	$t_{\min} = 0,5 \text{ mm};$ $d_{\min} = 0,7 \text{ mm}$	$t_{\min} = 0,4 \text{ mm};$ $d_{\min} = 0,5 \text{ mm}$
I4.2	QR-Code	Größe des QR-Codes	$r_{\min} = 0,7 \text{ mm}$	$r_{\min} = 0,5 \text{ mm}$
I5.1	RFID/NFC	Größe des Transponders	$b_{\max} = 18 \text{ mm};$ $h_{\max} = 18 \text{ mm};$ $t_{\max} = 0,5 \text{ mm};$ $d_{\max} = 20 \text{ mm}$	$b_{\max} = 15 \text{ mm};$ $h_{\max} = 15 \text{ mm};$ $t_{\max} = 0,4 \text{ mm};$ $d_{\max} = 18 \text{ mm}$

Legende: $b_{\max/\min}$ = maximale/minimale Elementbreite; $h_{\max/\min}$ = maximal/minimal Elementhöhe; $t_{\max/\min}$ = maximale/minimale Elementtiefe; a_{\min} = minimaler Elementabstand; A_{\min} = minimale Querschnittsfläche; $d_{\max/\min}$ = maximaler/minimaler Elementdurchmesser; r_{\min} = minimaler Elementradius; $l_{\max/\min}$ = maximale/minimale Elementlänge; s_{\min} = minimale Elementabstand; FDM = Fused Deposition Modelling™ (Strangablegeverfahren); SLS = Selektives Lasersintern™ (Kunststoff-Laser-Sintern)

Die Werte für die generellen Bauteilprüfungen, beispielsweise Prüfung auf Mindestwandstärken, werden in der Durchführung der Validierung direkt im rechnergestützten Werkzeug der Bauteilkennzeichnung verarbeitet.

6.3 Durchführung der Validierung

Die Durchführung der Validierung gliedert sich in zwei Phasen. In der ersten Phase wird parallel für die beiden definierten Kundentypen jeweils die bauteilindividuelle und verfahrensspezifische K-I-Kombination ausgewählt und am Bauteil angebracht. Dies erfolgt über das Assistenzsystem innerhalb der Software-Applikation *additiv-ID* in Verbindung mit *Autodesk Netfabb*. Die zweite Phase zeigt die bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Identifikation und Nachverfolgung am Beispiel eines Kundentypen. Da sich die Prinzipien in der zweiten Funktionalität gleichen, reicht die Betrachtung eines Kundentypen aus. In der ersten Phase sollen demgegenüber zwei Kundentypen betrachtet werden, um Unterschiede hinsichtlich des Anforderungsprofil und deren Auswirkungen auf die Funktion des Werkzeuges aufzuzeigen und zu validieren.

6.3.1 K-I-Kombination auswählen und an Bauteil anbringen

Die Benutzungsoberfläche für Kundentyp 1 zur Bauteilkennzeichnung ist in Abbildung 6-3 dargestellt. Die zu kennzeichnende Bauteilgeometrie besitzt die Identifikationsnummer 001001. Die Informationen aus dem Anforderungsprofil des Kunden sind über die objektorientierte Datenbank, basierend auf dem Informationsmodell, in die Benutzungsoberfläche übertragen worden. Weiterer Input bildet die Bauteilgeometrie in der Version 2, der orientierten Version des Festkörpergelechts, basierend auf den durchgeführten Analysen und den Auswahlabfragen werden die Attributwerte für die bauteilbezogenen Attribute aktualisiert. Die Bauteilgeometrie erfüllt alle Attribute zur Bauteilgeometrie bis auf die Verwendung einer Boundingbox. Für den Einsatz der Gestaltungsregeln wurde vom System der Parametersatz für das Fertigungsverfahren Strangablegeverfahren (FDM) ausgewählt. Das Ergebnis der Auswahl einer bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen K-I-Kombination lautet für den Kundentyp 1 und der zu fertigenden Bauteilgeometrie K_6I_1 , also eine Kombination aus partiell umschließendem Formelement und optischer Zeichenerkennung in Form von Klarschrift.

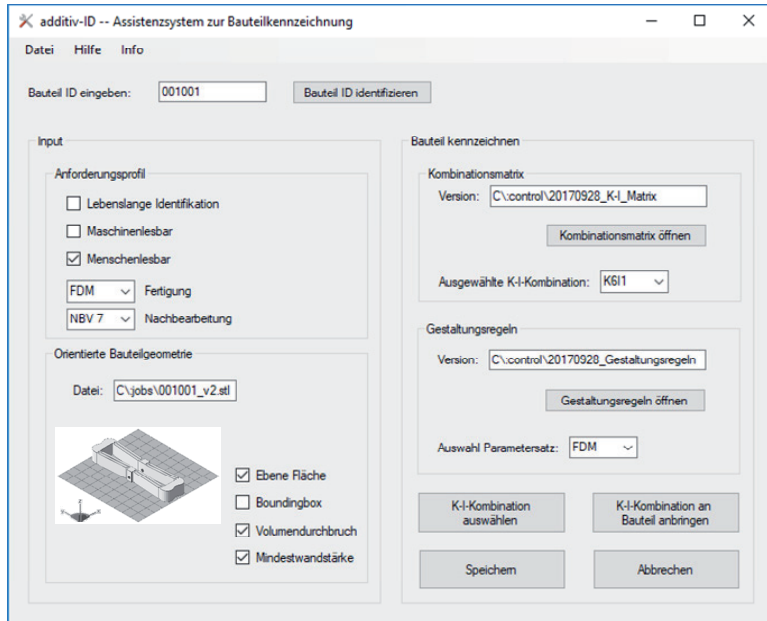
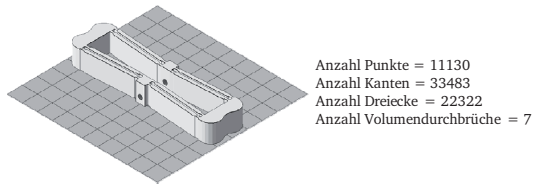


Abbildung 6-3: Benutzungsoberfläche zur Bauteilkennzeichnung für Kundentyp 1

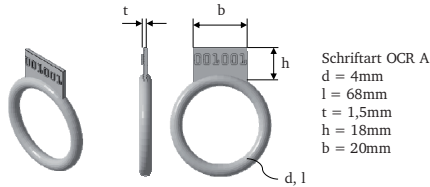
Nach der Auswahl der K-I-Kombination wird diese an das Bauteil angebracht. Im Fall des Kennzeichnungsträgers K6 erfolgt die Anbringung systemgestützt durch den Anwender. Das Ergebnis ist in Abbildung 6-4 dargestellt. In dieser Abbildung ist die Arbeitsfolge der Funktion schrittweise abgebildet.

Basierend auf der entwickelten Methode und den Programmanpassungen in *Autodesk Netfabb* kann die Bauteilgeometrie samt Kennzeichnung im System gespeichert und weiter an die Bauteilpositionierung gegeben werden. Die Speicherung erfolgt in der Version 3, diese verweist auf den durchlaufenen dritten Prozessschritt der Bauteilkennzeichnung. Die erzeugte Kennzeichnungsmethode ermöglicht das Auslesen durch den Mitarbeiter im In- und Post-Prozess sowie das Lackieren des Bauteils in der Nachbearbeitung. Da keine boolesche Vereinigung von Kennzeichnungskombination und Bauteil erfolgt, kann das Bauteil auf der gesamten Oberfläche lackiert werden.

Schritt 1: Orientierte Bauteilgeometrie prüfen



Schritt 2: Bereitstellung K-I-Template



Schritt 3: Modifizierung Bauteilgeometrie

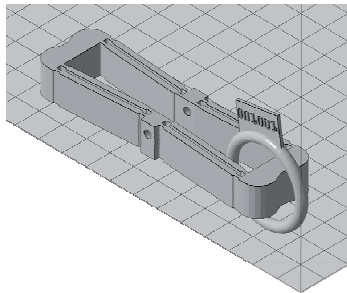


Abbildung 6-4: Anbringung K-I-Kombination für Kundentyp 1

Analog zu Kundentyp 1 lassen sich die oben gezeigten Informationen auch für Kundentyp 2 generieren, siehe Abbildung 6-5. Die zu fertigende Bauteilgeometrie mit der Bauteil-ID 001002 in Form einer Turbinenschaufel erfüllt die Attribute *Ebene Fläche* und *Mindestwandstärke*. Hierdurch kann die geeignete Kombination K_2I_3 an der orientierten Bauteilgeometrie angebracht werden. Die Auswahl dieser Kombination durch das Assistenzsystem zur Bauteilkennzeichnung, basierend auf der ausgefüllten universalen K-I-Kombinationsmatrix, setzt sich final durch eine bessere wirtschaftliche Wertigkeit gegenüber technisch gleichwertigen Lösungskombinationen durch. Der hier gewählte Parametersatz für die Gestaltungsregeln wird entsprechend dem Anforderungsprofil ausgewählt. Die final angebrachte K-I-Kombination ermöglicht in der Nachbearbeitung das geforderte Gleitschleifen (NBV5) und ist lebenslang durch den Kunden identifizierbar.

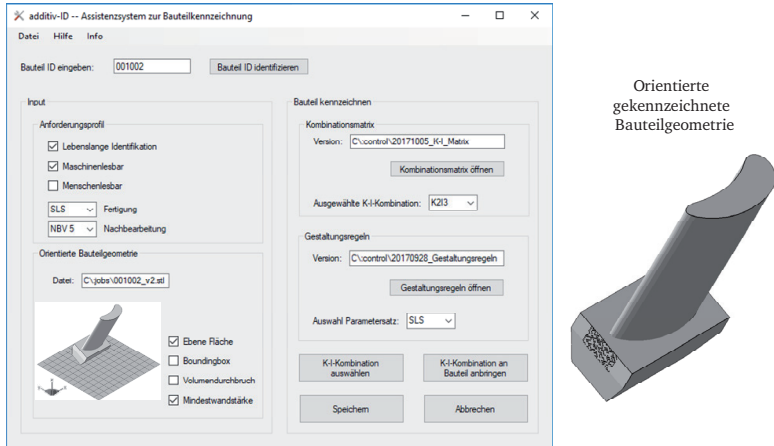


Abbildung 6-5: Benutzeroberfläche (links) und gekennzeichnete Bauteilgeometrie (rechts) für Kundentyp 2

6.3.2 Bauteilindividuelle Informationen identifizieren und nachverfolgen

Nachdem die zu fertigenden Bauteile den Prozess der kundenindividuellen Additiven Fertigung durchlaufen haben und sich in der Nutzung befinden, können über die vergebene Bauteil-ID relevante Informationen ausgelesen werden. Das Identifizieren von Bauteilen ist natürlich zu jeder Zeit im Prozess möglich, jedoch ist der Informationsumfang dementsprechend geringer. Für die Validierung soll im Folgenden das Bauteil von Kundentyp 2 verwendet werden, welches bereits die Prozesskette bis zur Nutzung durchlaufen hat. In den folgenden Abschnitten werden exemplarisch die bauteilindividuellen Informationen basierend auf dem Informationsmodell prozessschrittorientiert beschrieben und in Form der jeweiligen Benutzeroberfläche visualisiert. Die exemplarische Auswahl umfasst dabei bauteilindividuelle Informationen zum Kundenauftrag und Allgemeinem (Abbildung 6-6), zur Bauteilkennzeichnung (Abbildung 6-7), zur Bauteilpositionierung (Abbildung 6-8) und zum In-Prozess (Abbildung 6-9). Die Informationsgenerierung und -darstellung zu den anderen Prozessschritten bzw. -phasen erfolgt auf identische Weise.

In Abbildung 6-6 werden zur Bauteil-ID die Kundenanforderungen und übergeordnete bauteilindividuelle Informationen gemäß Informationsmodell angezeigt.

Hierzu gehören neben den Adressinformationen des Kunden u. a. das zu fertigende Bauteilvolumen und -oberfläche, das eingesetzte additive Fertigungsverfahren sowie Informationen zu Bauteilkosten und Energieverbrauch. Ferner wird dem Anwender die vom Kunden zur Verfügung gestellte Bauteilgeometrie visualisiert.

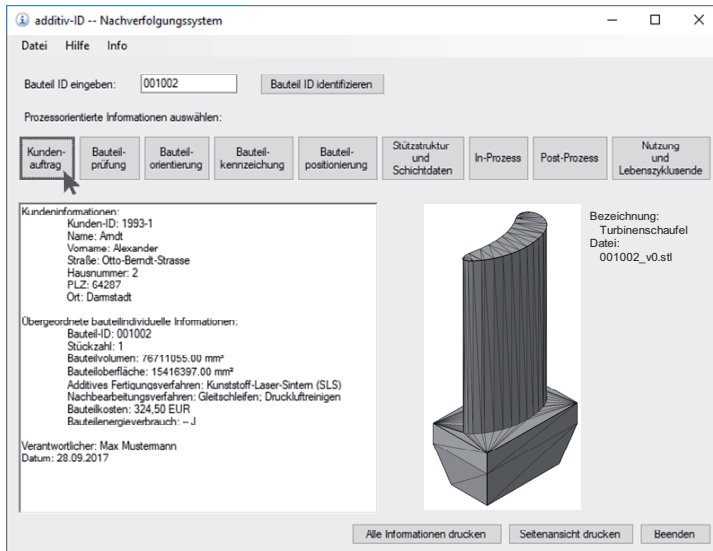


Abbildung 6-6: Benutzungsoberfläche zur Identifikation und Nachverfolgung – Allgemeine Informationen zum Kundenauftrag

Abbildung 6-7 zeigt den Informationsbrowser zum Prozessschritt Bauteilkennzeichnung. Die primären Informationen umfassen das Anforderungsprofil des Kunden, die Auswahl der K-I-Kombination und die Anbringung der K-I-Kombination. Hierdurch kann der Anwender die relevanten Attributwerte, welche bei der Kennzeichnung verwendet wurden, einsehen und nachvollziehen. Dies umfasst beispielsweise die Bauteilprüfergebnisse oder welche Gestaltungsregeln systemseitig betrachtet wurden. Im rechten Bereich der Benutzungsoberfläche wird dem Anwender die orientierte, gekennzeichnete Turbinenschaufel sowie der eingesetzte Identifikator veranschaulicht.

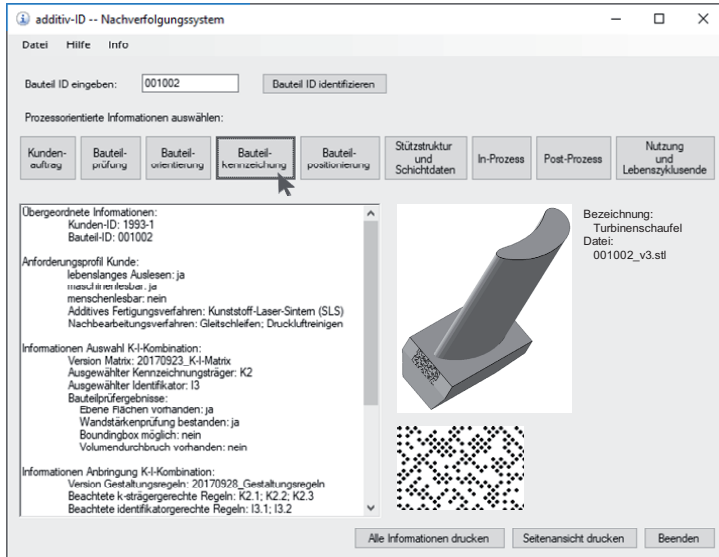


Abbildung 6-7: Benutzungsoberfläche zur Identifikation und Nachverfolgung – Bauteilkennzeichnung

Die bauteilindividuellen Informationen zur Bauteilpositionierung sind in Abbildung 6-8 abgebildet. In der oberen Benutzungsoberfläche von *additiv-ID* werden dem Anwender alle im Informationsmodell hinterlegten Informationen zu diesem Prozessschritt nach Angabe der Bauteil-ID angezeigt. Ein Informationsblock besteht aus Informationen zum Bauraum. Hier werden neben der Anzahl simultan gefertigter Bauteile ebenfalls die Positionierungsparameter beschrieben. Dazu gehören Informationen zum verwendeten Packalgorithmus oder eingehaltene Mindestabstände zwischen Bauteilen und zur Bauraumberandung. Ein weiterer Informationsblock beinhaltet die bauteilindividuelle Position im Bauraum. Diese wird auch im rechten Bereich der Benutzungsoberfläche visualisiert.

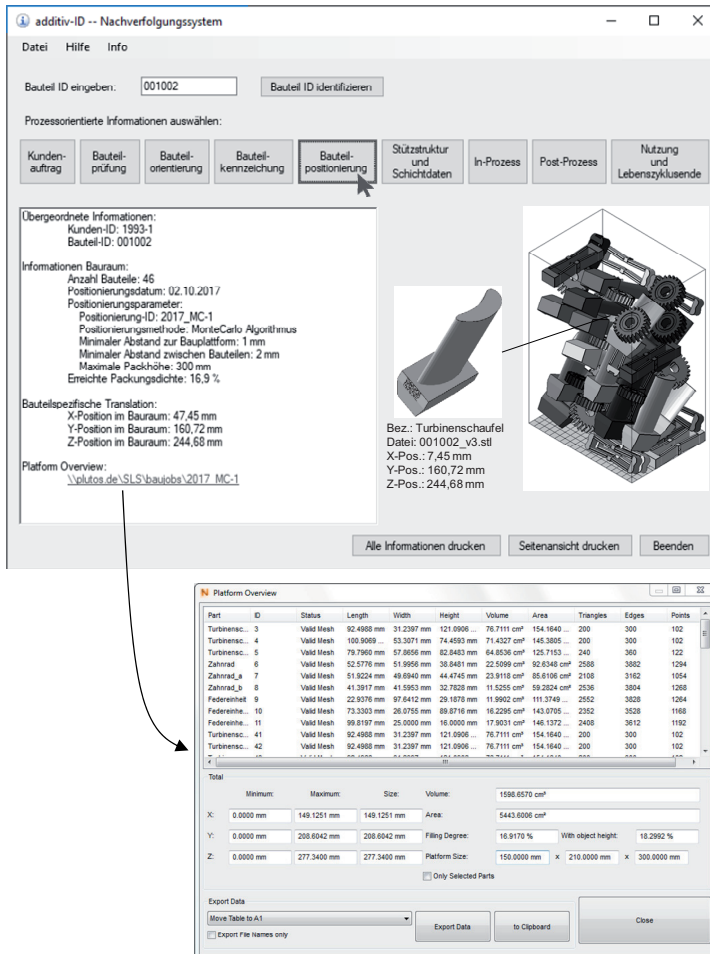


Abbildung 6-8: Benutzungsoberfläche zur Identifikation und Nachverfolgung – Bauteilpositionierung

Außerdem wird dem Anwender eine Verlinkung zu einer detaillierten Auflistung aller im Bauraum enthaltenen Bauteile inklusive Detailinformationen zur Verfügung gestellt. Dieser Überblick bildet in Abbildung 6-8 das im unteren Bereich dargestellte Informationsfenster. Das Informationsfenster wird direkt in *Autodesk Netfabb* erstellt und über die Datenschnittstelle bereitgestellt. Diese umfangreichen bauteilindividuellen Informationen zum Prozessschritt Bauteilpositionierung

ermöglichen dem Anwender den einfachen Zugang für eine nachgelagerte bauteilindividuelle Analyse.

Abschließend in diesem Unterkapitel wird in Abbildung 6-9 beispielhaft das Informationsfenster zum Prozessschritt In-Prozess gezeigt. Hier werden primär Informationen zum Verfahren bzw. zur eingesetzten Fertigungsmaschine angezeigt. Die angezeigten Fertigungsparameter basieren auf der Struktur und den Inhalten des Informationsmodells und beschreiben das eingesetzte Material, die eingestellte Laserleistung, die Bauraumtemperaturen während der Fertigung sowie Schichtstärke und gewählte Pulvermischung.

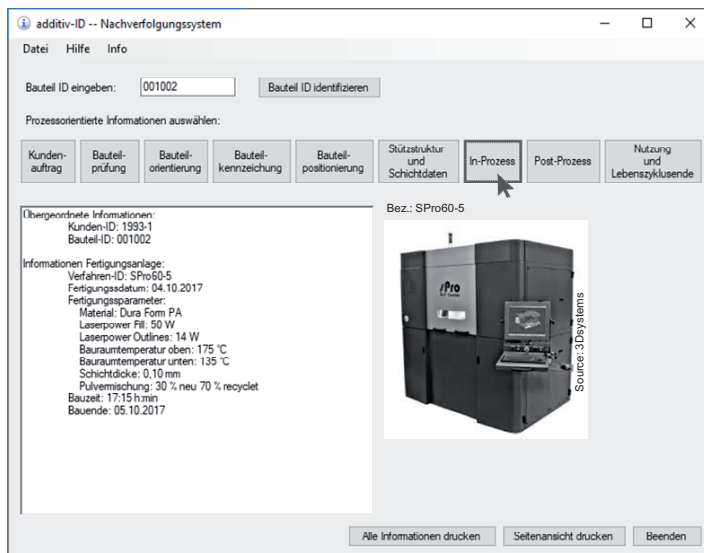


Abbildung 6-9: Benutzungsoberfläche zur Identifikation und Nachverfolgung – In-Prozess

6.4 Verifikation des Anforderungsprofils

Die erfolgreiche prototypische Implementierung und durchgeführte Validierung demonstrieren die Tragfähigkeit und die Anwendbarkeit des Konzepts zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung. In diesem Unterkapitel soll mit der daran anschließenden Verifikation das Konzept und die Implementierung hinsichtlich der postulierten Anforderungen in Kapitel 3 geprüft werden. Der Erfüllungsgrad jeder Anforderung in Tabelle 6-3 zusammenfassend dargestellt.

Die Festforderungen an die Methode zur Kennzeichnung sind alle vollständig erfüllt. Die Methode verwendet einen Kennzeichnungsansatz bestehend aus Kennzeichnungsträger- und Identifikatorart und baut auf dem Informationsmodell als zentraler Bestandteil des Konzeptes auf (siehe Anforderungen 1 und 2). Ferner ermöglicht die zweistufige Auswahl der Methode eine vorgeschaltete Minimierung in Frage kommender Kombinationsmöglichkeiten (siehe Anforderungen 3 und 4). Die betrachteten Kombinationsmöglichkeiten von Kennzeichnungsträger und Identifikator zielen auf eine prozessintegrierte Anbringung an die kundenindividuellen Bauteile ab (siehe Anforderung 6). Diese Anbringung basiert auf der orientierten Bauteilgeometrie und erfolgt durch geometrische und topologische Abfragen und Modifizierungen der Bauteilgeometrie (siehe Anforderung 7). Grundlage für das Modifizieren der Geometrieinformationen sind entwickelte Gestaltungsregeln zur kennzeichnungsträger- und identifikatorgerechten Anbringung (siehe Anforderung 8). Der Wunsch an die Methode, Bauteile nacheinander kennzeichnen zu können (siehe Anforderung 9) ist im Konzept integriert.

Die Anforderungen an das Informationsmodell sind alle vollständig erfüllt. Die Verwendung von einem Kernmodell, über welches Informationen integriert werden, und verschiedenen Partialmodellen ermöglicht die Erweiterbarkeit des Informationsmodells zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung (siehe Anforderung 10). Das Kernmodell beinhaltet und integriert die zentralen Informationen zu einem individuellen Kundenauftrag, hierzu zählen insbesondere die Bauteilgeometrie und das Anforderungsprofil des Kunden (siehe Anforderungen 11 bis 13). In den verschiedenen Partialmodellen werden die Attribute, Methoden und Beziehungen aus den Prozessschritten der Prozesskette zur bauteilindividuellen Additiven Fertigung formal beschrieben (siehe Anforderungen 14 bis 18). Aufbauend auf dem entwickelten Informationsmodell als zentraler Wissensspeicher wird eine durchgängige Identifikation für die Additive Fertigung ermöglicht (Anforderung 19).

Die definierten Festforderungen an die durchgängige Identifikation sind vollständig erfüllt. Die durchgängige Identifikation startet und funktioniert anhand einer eindeutigen Bauteil-ID (siehe Anforderung 20). Grundgerüst hierfür bildet das Informationsmodell, welches alle beteiligten Prozessschritte und -phasen hinsichtlich relevanter Informationen repräsentiert (siehe Anforderungen 21 bis 24). Im Anforderungsprofil sind drei Wünsche an die durchgängige Identifikation gestellt (siehe Anforderungen 25 bis 27). Der konzeptionelle Gedanke zur Bereitstellung einer durchgängigen Identifikation ermöglicht das Ableiten von höherwertigen Informationen, wie beispielsweise eine bauteilindividuelle Kostenermittlung oder

Energiebedarfsermittlung. Jedoch wird eine Vorgehensweise oder Methode zur Berechnung dieser Informationen nicht explizit bereitgestellt. Es wird hierzu die Basis in Form von aggregierten Informationen als Eingangsgrößen für weiterführende Entwicklungen erarbeitet und zur Verfügung gestellt. Daher sind die Wünsche bzw. Anforderungen 25 bis 27 nur teilweise erfüllt.

Die Festforderungen an die Implementierung bzw. an die Softwareapplikation sind alle vollständig erfüllt. Aufbauend auf dem Informationsmodell werden die verarbeiteten Informationen zur gesamten Prozesskette und den Prozessphasen durchgängig bereitgestellt (siehe Anforderungen 28, 31 und 32). Der Anwender interagiert über eine Benutzeroberfläche mit der Software-Applikation und greift so auf die beiden entwickelten und implementierten Systemfunktionalitäten zu (siehe Anforderung 30). Neben der durchgängigen Identifikation stellt das rechnergestützte Werkzeug zur Kennzeichnung der Bauteilgeometrie eine Kernfunktionalität des Systems dar. Hierzu ist die Pre-Prozess-Software *Autodesk Netfabb* über eine Datenschnittstelle im Assistenzsystem integriert (siehe Anforderungen 29 und 34). Aufbauend auf den nur teilweise erfüllten Wünschen bzw. Anforderungen an die durchgängige Identifikation (siehe Anforderungen 25 bis 27), werden diese in der Implementierung ebenfalls, aus genannten Gründen, teilweise erfüllt (siehe Anforderung 33).

Tabelle 6-3: Übersicht der Anforderungserfüllung (fortlaufend)

Nr.	Bezeichnung	Erfüllungsgrad
Anforderungen an die Methode zur Kennzeichnung		
1	Die Methode zur Kennzeichnung muss bauteilindividuell und verfahrensspezifisch einen Kennzeichnungsansatz bestehend aus Kennzeichnungsträger und Identifikator definieren.	●
2	Die Methode zur Kennzeichnung muss basierend auf dem Informationsmodell die technische Machbarkeit möglicher Kombinationen aus Kennzeichnungsträger und Identifikator nachweisen und bereitstellen.	●
3	Die Methode zur Kennzeichnung muss basierend auf der Bauteilgeometrie die Lösungsmenge in Frage kommender Kombinationen aus Kennzeichnungsträger und Identifikator vorgeschaltet minimieren.	●

Tabelle 6-3: Übersicht der Anforderungserfüllung (fortlaufend)

Nr.	Bezeichnung	Erfüllungsgrad
4	Die Methode zur Kennzeichnung muss basierend auf dem Anforderungsprofil des Kunden die Lösungsmenge in Frage kommender Kombinationen aus Kennzeichnungsträger und Identifikator vorgeschaltet minimieren.	●
5	Die Methode zur Kennzeichnung muss optionale Anforderungen durch den Kunden berücksichtigen und verarbeiten.	●
6	Die Methode muss das prozessintegrierte Kennzeichnen der Bauteile im In-Prozess ermöglichen.	●
7	Die Methode zur Kennzeichnung muss die Festlegung der räumlichen Lage des Kennzeichnungsansatzes auf geometrischer und topologischer Basis lösen.	●
8	Die Methode zur Kennzeichnung muss das Bauteilgeometriemodell basierend auf Gestaltungsregeln durch den ausgewählten Kennzeichnungsansatz erweitern.	●
9	Die Methode zur Kennzeichnung soll das Modifizieren einer endlichen Menge an zu fertigenden Bauteilen sequentiell verarbeiten können.	◐
Anforderungen an das Informationsmodell		
10	Das Informationsmodell muss modular aufgebaut und erweiterbar sein.	●
11	Die Kerninformationen zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation in der Additiven Fertigung müssen im Kernmodell abgebildet werden.	●
12	Das Informationsmodell muss die zu fertigende Bauteilgeometrie enthalten.	●
13	Das Informationsmodell muss das Anforderungsprofil des Kunden abbilden.	●

Tabelle 6-3: Übersicht der Anforderungserfüllung (fortlaufend)

Nr.	Bezeichnung	Erfüllungs- grad
14	Das Informationsmodell muss Attribute und Eigenschaften zur Bauteilprüfung abbilden, insbesondere gewählte verfahrensspezifische Prüfkriterien.	●
15	Das Informationsmodell muss Attribute und Eigenschaften der Bauteilorientierung und -positionierung abbilden, insbesondere die bauteilindividuelle modifizierte Rotation und Translation.	●
16	Das Informationsmodell muss den bauteilindividuellen und verfahrensspezifisch gewählten Kennzeichnungsansatz abbilden und über das Kernmodell integrieren.	●
17	Das Informationsmodell muss Informationen der etwaig anfallenden Stützstrukturgenerierung und Schichtdaten-erstellung enthalten.	●
18	Das Informationsmodell muss Informationen aus dem In- und Post-Prozess über das Kernmodell integrieren und bereitstellen.	●
19	Das Informationsmodell muss die durchgängige Identifikation in der Additiven Fertigung gewährleisten.	●
Anforderungen an die durchgängige Identifikation		
20	Die durchgängige Identifikation muss anhand einer einmalig vergebenen und somit eindeutigen Identifikationsnummer erfolgen.	●
21	Die durchgängige Identifikation muss auf der Struktur des Informationsmodells aufbauen.	●
22	Die durchgängige Identifikation muss die Bereitstellung der bauteilindividuellen Informationen bis zum Lebenszyklusende des Bauteils bereitstellen.	●
23	Die durchgängige Identifikation muss dem Bauteil die individuellen Informationen aus den durchlaufenen virtuellen Prozessschritten eindeutig zuordnen.	●

Tabelle 6-3: Übersicht der Anforderungserfüllung (fortlaufend)

Nr.	Bezeichnung	Erfüllungsgrad
24	Die durchgängige Identifikation muss das physische Auslesen von Identifikationsarten im In- und Post-Prozess unterstützen und integrieren.	●
25	Die durchgängige Identifikation soll eine Vorgehensweise definieren, die es erlaubt, Wechselwirkungen von Bauteildefekten in der Nutzung und durchgeführten bauteilindividuellen Pre-Prozessschritten aufzuzeigen.	◐
26	Die durchgängige Identifikation soll eine Vorgehensweise definieren, die es erlaubt, bauteilindividuelle Energiebedarfe zu ermitteln.	◐
27	Die durchgängige Identifikation soll eine Vorgehensweise definieren, die es erlaubt, bauteilindividuelle Kosten zu ermitteln.	◐
Anforderungen an die Implementierung		
28	Die Software-Applikation muss die durchgängige Identifikation von bauteilindividuellen Informationen in Form eines Nachverfolgungssystems bereitstellen.	●
29	Die Software-Applikation muss eine Datenschnittstelle für die domänenspezifische Anwendungssoftware bereitstellen.	●
30	Die Software-Applikation muss eine grafische Benutzungsoberfläche zur Interaktion und Navigation bereitstellen.	●
31	Die Software-Applikation muss die bauteilindividuellen Informationen aus dem Pre-Prozess über das Nachverfolgungssystem präsentieren.	●
32	Die Software-Applikation muss die bauteilindividuellen Informationen aus dem In- und Post-Prozess sowie der Nutzung und dem Lebenszyklusende über das Nachverfolgungssystem präsentieren.	◐

Tabelle 6-3: Übersicht der Anforderungserfüllung (fortlaufend)

Nr.	Bezeichnung	Erfüllungs- grad
33	Die Software-Applikation soll die bauteilindividuellen Informationen zur Kostenzusammensetzung, zum Energiebedarf und Rückschlüssen auf ein Bauteilversagen visualisieren.	●
34	Die Software-Applikation muss den Anwender (teil-)automatisiert bei der Bauteilkennzeichnung über ein Assistentensystem unterstützen.	●

Legende: ● = vollständig erfüllt; ◐ = teilweise erfüllt; ○ = nicht erfüllt

6.5 Fazit

Die Ergebnisse der prototypischen Implementierung und der durchgeführten Validierung bestätigen die Tragfähigkeit des entwickelten Konzeptes zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung. Die entwickelte Software-Applikation *additiv-ID* wurde anhand der beiden Kundentypen 1 und 2 und repräsentativen Beispielbauteilen getestet. Es konnte demonstriert werden, dass beide Kernfunktionalitäten der Applikation, wie konzeptioniert, funktionieren und den Mitarbeiter im Pre-Prozess bzw. den Anwender unterstützen.

Durch die Integration des rechnergestützten Werkzeuges zur Bauteilkennzeichnung in die bereits bestehende Software zum Pre-Prozess erfolgt eine systemintegrierte und benutzerfreundliche Lösung. Der Mitarbeiter im Pre-Prozess muss diese Anwendung zum Kennzeichnen von Bauteilen nicht verlassen und er kann somit den gesamten Pre-Prozess in einem Programm durchführen. Dabei erhält er durch die integrierten Benutzungsoberflächen und die hinterlegten Methoden eine bedarfsgerechte Unterstützung beim Durchführen der Bauteilkennzeichnung. Er muss nicht mehr rein auf seinem Erfahrungswissen agieren. Denn der Mitarbeiter im Pre-Prozess erhält systemgestützt die für das vorliegende Bauteil und das vorhandene Anforderungsprofil optimale Kennzeichnungskombination bestehend aus Kennzeichnungsträger und Identifikator. Hierdurch werden Fehler in der Bauteilkennzeichnung eliminiert, denn es werden nur technisch umsetzbare Lösungen vorgeschlagen und am Bauteil angebracht. Die programmiertechnische Anpassung

von *Autodesk Netfabb* ermöglicht eine Unterstützung für den Anwender bei der Bauteilkennzeichnung. Die entwickelten und im Assistenzsystem implementierten Gestaltungsregeln für eine kennzeichnungsträger- und identifikatorgerechte Anbringung führen zu einer qualitätsgerechten und erfolgreichen Fertigung der Bauteile samt Kennzeichnungskombination. Durch das Verwenden dieser Gestaltungsregeln wird das Fertigen von Ausschuss minimiert und eine sichere physische Identifikation gewährleistet.

Die Implementierung des prozessorientierten Informationsbrowsers erlaubt dem Anwender eine durchgängige Identifikation und Nachverfolgung von kundenindividuellen Bauteilen. Die Validierung hat die Verwendung eines Informationsmodells, bestehend aus Kernmodell und Partialmodellen, positiv bestätigt. Hierdurch können dem Anwender alle relevanten bauteilindividuellen Informationen bedarfsgerecht zur Verfügung gestellt werden. Die Demonstration der verschiedenen prozessschrittspezifischen Informationen in der Validierung ermöglichen dem Anwender Rückschlüsse auf ein etwaig auftretendes Bauteilversagen zuziehen. Ferner können durch die bauteilindividuellen Informationen individuelle Kosten und Energieverbräuche abgeleitet werden. Die Validierung hat gezeigt, dass hierfür das Fundament in Form der Software-Applikation und der darin implementierten Methoden gelegt ist.

Zusammenfassend konnte anhand der prototypischen Implementierung und der durchgeführten Validierung nachgewiesen werden, dass manuelle Tätigkeiten im Pre-Prozess minimiert werden und sich die Qualität durch das methoden- und verfahrensorientierte Agieren in der Prozesskette erhöht. Die Erweiterung im Pre-Prozess der Prozesskette zur bauteilindividuellen Additiven Fertigung führt zu einem großen Nutzen in den physischen Prozessschritten und -phasen. Der Mitarbeiter im In- und Post-Prozess ist nicht mehr auf das fehleranfällige und manuelle Zuordnen von Bauteilen zu Kunden angewiesen. Dieser Missstand wird durch die Modifikation der Bauteilgeometrie hinsichtlich des Kennzeichnungsansatzes und der Ermöglichung Bauteile eindeutig zu identifizieren eliminiert.

Die abschließende Verifikation bringt hervor, dass alle Festforderungen erfüllt sind. Die gestellten Wünsche an die durchgeführten Arbeiten im Rahmen dieser Dissertation sind teilweise erfüllt und bieten eine fundierte Grundlage für weitere hierauf aufbauende Arbeiten. Ferner muss die parallele Bauteilkennzeichnung von mehreren zu fertigenden Bauteilen betrachtet werden. Durch die technische Umsetzung wurde aufgedeckt, dass die Arbeitsfolge sequentiell erfolgen muss. Für eine Parallelisierung und somit eine Verkürzung in der Datenaufbereitung ist das Assistenzsystem zur Bauteilkennzeichnung nicht ausgelegt.

7 Ausblick

In dieser Dissertation wurde ein Konzept für die bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung entwickelt. Bei der Überprüfung der Tragfähigkeit des Konzeptes und der Validierung des prototypisch implementierten Nachverfolgungs- und Assistenzsystems haben sich weitere Fragestellungen und Anwendungsfälle herausgestellt. In diesem Kapitel werden diese als fortführende Entwicklungs- und Forschungspotenziale vorgestellt.

Die Entwicklung der Methode zur Bauteilkennzeichnung und des Informationsmodells stellen generelle Gestaltungsregeln für die kennzeichnungsträger- und identifikatorgerechte Anbringung von einem Kennzeichnungsansatz zur Verfügung. Ferner bildet die Kennzeichnungsträger-Identifikator-Kombinationsmatrix einen essentiellen Bestandteil der Entwicklungen. Für eine umfassende Implementierung und Verwendung des Assistenzsystems zur Bauteilkennzeichnung gilt es systematisch Attributwerte der Kombinationsmatrix und spezifische Werte für die Gestaltungsregeln zu erarbeiten. Im Rahmen der Validierung wurden für eine repräsentative Auswahl von K-I-Kombinationen diese Werte bestimmt. Diese Bestimmung beruht auf durchgeführten Tests und der Analyse von Fachliteratur. Hierauf aufbauend hierzu müssen die generellen Gestaltungsregeln mit spezifischen verfahrensabhängigen Werten quantifiziert werden. Diese Spezifizierungen ziehen auch den Forschungsbedarf nach der Betrachtung weiterer additiver Fertigungsverfahren und Nachbearbeitungsverfahren nach sich. Es ist zu prüfen welche Granularität hinsichtlich der Verfahren und den hier anfallenden bauteilindividuellen Informationen wünschenswert ist. Beispielsweise ist neben der Betrachtung des Fertigungsverfahrens die Einbeziehung spezifischer Fertigungsanlagen bzw. -maschinen denkbar. Weiterhin gilt es am Bauteil örtlich durchführbare Nachbearbeitungsverfahren zu analysieren. Dies umfasst u. a. das Fräsen einzelner Bauteilflächen im Post-Prozess. Hier muss die Methode die Sperrung bzw. die Definition solcher Flächen ermöglichen, um diese im weiteren Verlauf für die Prüfung und Anbringung einer K-I-Kombination auszuschließen.

Die entwickelte Kombinationsmatrix, in der die anforderungs- und geometriebasierte technische Machbarkeit eines Kennzeichnungsansatzes geprüft wird, eignet

sich nicht nur als Grundlage und Steuergröße für die Methode zur Bauteilkennzeichnung. Sie kann auch als Leitfaden für den Anwender genutzt werden. Dieser Leitfaden zur kennzeichnungsträger- und identifikatorgerechten Gestaltung von Identifikationsansätzen dient dem Anwender im Pre-Prozess als virtuelle oder dokumentenbasierte Unterstützung bei der Kennzeichnung von additiv zu fertigenden Bauteilen. Es ist zu prüfen, in welcher Form und in welchem Umfang diese Art der Anwendung der Kombinationsmatrix, ohne Integration in eine Software-Applikation, umgesetzt werden kann.

Das prototypisch implementierte Nachverfolgungssystem in der Software-Applikation *additiv-ID* stellt die relevanten bauteilindividuellen Informationen prozessschrittspezifisch bereit. Aufbauend auf den einzelnen Informationen aus der Prozessphase Kundenauftrag, dem Pre-Prozess, dem In-Prozess, dem Post-Prozess sowie den Lebenszyklusphasen Nutzung und Lebenszyklusende können höherwertige Informationen bauteilindividuell generiert werden. Hierzu ist die Entwicklung von Verfahren und Methoden zur exakten bauteilindividuellen Energiebedarfs- oder Kostenbestimmung erforderlich. Darüber hinaus bietet das bereitgestellte Fundament an Informationen die Möglichkeit Wechselwirkungen zwischen einem etwaig anfallenden Bauteilversagen und einem durchlaufenen Prozessschritt zu identifizieren. Hier gilt es ebenfalls wissenschaftliche Betrachtungen durchzuführen. Das entwickelte Gesamtkonzept ermöglicht die virtuelle und physische Identifikation und Nachverfolgung von additiv gefertigten Bauteilen. Im Rahmen der Initiative Industrie 4.0 und der stetig voranschreitenden Digitalisierung bildet die Informationsbereitstellung und individuelle Nachverfolgung von Objekten einen wesentlichen Bestandteil. Durch die vorliegende Dissertation wurde hierzu eine umfangreiche Grundlage für die Additive Fertigung geschaffen. Für weitere Entwicklungs- und Forschungsarbeiten ist die Anpassung der Software-Applikation *additiv-ID* im Sinne von Industrie 4.0 zu analysieren. Dies umfasst einerseits die Anbindung von Ausleseeinheiten direkt an das Nachverfolgungssystem, hierdurch findet ein automatisierter Prozess beim Identifizieren von Bauteilen im In- und Post-Prozess sowie in der Nutzung statt. Andererseits gilt es den Kunden an die Software-Applikation anzubinden. Hierzu sind ein Sichtenkonzept und weitere Daten- und Informationsschnittstellen zu definieren. Außerdem ist die Auslegung des Nachverfolgungssystems als webbasierte Anwendung oder als App für mobile Endgeräte auszulegen.

Additive Fertigungsverfahren erlauben das Fertigen von komplexen Bauteilstrukturen, die bisher mit keinem anderen Fertigungsverfahren oder nur unter hohem

Aufwand herzustellen sind. Dies ermöglicht beispielsweise die Fertigung von bionischen Strukturen, welche aus komplexen Flächenzügen bestehen. Das entwickelte Konzept betrachtet Bauteilgeometrien, die keinerlei ebene Flächen besitzen derzeit noch nicht. Lediglich das Anbringen von partiell- und voll-körperumschließenden Kennzeichnungsträgern wird hier ermöglicht. Zum Einsatz der weiteren Kennzeichnungsträger müssen die generellen Gestaltungsregeln samt geometrischer Templates für die Verwendung bei bionischen Bauteilstrukturen angepasst und erweitert werden. Additive Fertigungsverfahren ermöglichen ferner die Fertigung von montagefreien Funktionsbaugruppen. Das rechnergestützte Werkzeug zur Bauteilkennzeichnung muss dahingehend untersucht werden, inwiefern sich die entwickelten Ansätze auf Baugruppen anwenden lassen.

Additiv gefertigte Bauteile sind in der Regel Bestandteile von Baugruppen. Diese Baugruppen können entweder rein aus additiv gefertigten Bauteilen oder aus einer Mischung von additiv und konventionell gefertigten Bauteilen bestehen. Für die ganzheitliche Betrachtung und Informationsbereitstellung müssen die bauteilindividuellen Informationen durch baugruppenspezifische Informationen erweitert werden. Hierzu zählen beispielsweise Nachbarschaftsbeziehungen zu weiteren Baugruppenkomponenten oder der Einsatzzweck des Bauteils innerhalb der Baugruppe. Für den produktiven Einsatz und eine baugruppengerechte Umsetzung des in der vorliegenden Dissertation entwickelten Konzeptes für ein bauteilindividuelles Informationsmodell empfiehlt sich die Integration bzw. Anbindung an ein PDM-System. Dieser Fortschritt ermöglicht, über die Speicherung der Elemente und Beziehungen in hierarchischen Strukturen, die Abbildung von Baugruppen und den darin enthaltenen Bauteilen. Hierdurch können baugruppenspezifische Informationen dem individuellen Bauteil zugeordnet werden.

Der modulare Aufbau des Informationsmodells zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung bietet das Forschungspotenzial das entwickelte Konzept zu erweitern. Zum einen können die entwickelten Ansätze auf andere Prozesskettendefinitionen der Additiven Fertigung angewendet werden. Dies umfasst beispielsweise die Bauteilkonstruktion im CAD-System, bisher bildet den Anfang der Prozesskette die bereits modellierte Bauteilgeometrie. Zum anderen bietet die Erweiterbarkeit des Informationsmodells die formale Beschreibung von Simulationsdaten von kundenindividuellen Bauteilen. Durch diese Möglichkeiten der Erweiterung des Konzeptes können umfangreichere bauteilindividuelle Informationen verarbeitet werden.

8 Zusammenfassung

Die Verwendung von additiven Fertigungsverfahren ermöglicht insbesondere das profitable Fertigen von geringen Stückzahlen gegenüber dem Einsatz von konventionellen Fertigungsverfahren [161]. Dies wird durch Fertigung ohne formgebende Werkzeuge oder materialintensive subtraktive Bearbeitungsverfahren ermöglicht. Die Ausprägung der Prozesskette ermöglicht somit das Fertigen von kundenindividuellen Bauteilen in einer geringen Stückzahl bis hinunter zu Losgröße 1 [96]. Die hauptsächliche Herausforderung für das Fertigungsunternehmen besteht darin, dass in einem Bauprozess verschiedene kundenindividuelle Bauteile simultan gefertigt werden. Dies führt zu einer aufwändigen kundenspezifischen Zuordnung von Bauteilinformationen zu den dazugehörigen Kunden. Diese Zuordnung erstreckt sich über die gesamte Prozesskette der bauteilindividuellen Additiven Fertigung, vom Eingang der Auftragsdaten, über den Pre-, In- und Postprozess bis hin in die Nutzung und das Lebenszyklusende des Bauteils. Die vorliegende Dissertation liefert daher Ansätze für eine durchgängige virtuelle und physische bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Identifikation für die Additive Fertigung.

Ausgehend von der Analyse des relevanten Standes der Technik und bestehender Forschungsarbeiten wurde ein Anforderungsprofil definiert. Aufbauend auf diesen Anforderungen wurde in dieser Dissertation ein Konzept zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung entwickelt. Das Konzept gliedert sich in zwei wesentliche Konzeptbausteine. Zum einen wird die Methode zur Bauteilkennzeichnung im Pre-Prozess erarbeitet, welche den Anwender in der erweiterten Prozesskette unterstützt. Zum anderen wird das Informationsmodell zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnung und Identifikation für die Additive Fertigung entwickelt. Hierauf aufbauend wird die Software-Applikation *additiv-ID* mit dem Nachverfolgungs- und Assistenzsystem zur Bauteilkennzeichnung prototypisch implementiert.

Die Methode zur Kennzeichnung von additiv zu fertigenden Bauteilen für den Anwender im Pre-Prozess erfordert die Anpassung und Erweiterung der Prozesskette zur bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Additiven Fertigung. Die Methode wird in den Prozessschritt Bauteilkennzeichnung integriert und gliedert sich

in zwei wesentliche Aktivitäten. In der ersten Aktivität wird für den jeweils vorliegenden Anwendungsfall die optimale Kombination aus Kennzeichnungsträger und Identifikator bestimmt. Ein Identifikator beschreibt ein zugewiesenes eindeutiges Merkmal zur Bauteilidentifikation. Der Kennzeichnungsträger wird zur Anbringung dieses Identifikators am Bauteil benötigt. Die Entwicklung und Beschreibung dieses Kennzeichnungsansatzes bestehend aus Kennzeichnungsträger und Identifikator im Rahmen der vorliegenden Dissertation stellt einen gänzlich neuen Ansatz im Bereich der Additiven Fertigung dar. Die Kombination der beiden Arten ermöglicht das Erfüllen verschiedener Anforderungsprofile seitens des Kunden. Grundlage für die Auswahl des optimalen bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnungsansatzes bildet die entwickelte K-I-Kombinationsmatrix. Diese Matrix dient als Wissensspeicher und prüft basierend auf anforderungs- und geometriebasierten Abfragen die technische Umsetzbarkeit einer K-I-Kombination. Ergebnis der ersten Aktivität der erarbeiteten Methode ist demnach die ausgewählte Kombination aus Kennzeichnungsträger und Identifikator. Aufbauend hierauf wird in der zweiten Aktivität der Methode diese Kombination an der Bauteilgeometrie angebracht. Für die qualitätsgerechte Anbringung wurden in der Dissertation generelle Gestaltungsregeln für die kennzeichnungsträger- und identifikatorgerechte Anbringung entwickelt. Unter Einbeziehung dieser Gestaltungsregeln werden die Bauteilgeometrien anhand von definierten Abläufen modifiziert. Grundlage für die geometrische und topologische Modifikation der Bauteilgeometrie im Pre-Prozess bilden Templates für Kennzeichnungsträger und Identifikator. Durch die entwickelte Methode wird die physische Identifikation von kundenindividuellen Bauteilen ermöglicht. Die angebrachten K-I-Kombinationen werden im In-Prozess simultan mitgefertigt und können hierdurch in nachgelagerten Prozessen und Phasen ausgelesen werden. Dies führt zu einer physischen bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Identifikation von additiv gefertigten Bauteilen.

Der zweite wesentliche Bestandteil des Konzeptes umfasst die Entwicklung des Informationsmodells. Die in der angepassten und erweiterten Prozesskette zur bauteilindividuellen Additiven Fertigung relevanten und anfallenden Informationen wurden formal in einem Informationsmodell beschrieben. Für die durchgängige Identifikation und Nachverfolgung von additiv gefertigten Bauteilen wurden die relevanten Informationen aus den beteiligten Prozessschritten in Form von Elementen, Beziehungen und Methoden im Informationsmodell abgebildet. Der Informationsumfang umfasst die Prozessschritte und -phasen der Bauteilprüfung, Bauteilorientierung, Bauteilkennzeichnung, Bauteilpositionierung sowie des In-

und Post-Prozesses. Ferner wurde im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtungsweise ebenfalls Informationen aus der Nutzung und dem Lebenszyklusende des Bauteils verarbeitet. Die hierdurch entstehende Komplexität des Informationsmodells wurde mit der Zerlegung des Modells in Partialmodelle reduziert. Zentrale bauteilindividuelle Informationen werden in einem Kernmodell abgebildet und über die einzelnen Partialmodelle integriert. Dieser modulare Aufbau des Informationsmodells ermöglicht eine Erweiterbarkeit der Informationen um weitere Prozessschritte und -phasen.

Aufbauend auf der entwickelten Methode zur Bauteilkennzeichnung und dem Informationsmodell für die bauteilindividuelle und verfahrensspezifische Identifikation wurde die Software-Applikation *additiv-ID* prototypisch implementiert. Diese Applikation dient zur Überprüfung der Tragfähigkeit des Konzeptes. Die Software-Applikation stellt dem Anwender das Assistenzsystem zur Kennzeichnung und das Nachverfolgungssystem zur Identifikation zur Verfügung. Hierfür wurde die Pre-Prozess-Software *Autodesk Netfabb* in die Software-Applikation *additiv-ID* integriert. Die Validierung des Systems wurde durch zwei differente Kundentypen und repräsentativen Bauteilen durchgeführt. Es konnte die Tragfähigkeit des Konzeptes und die Funktionsfähigkeit der Implementierung bestätigt werden.

Als weiteres Forschungspotenzial konnte die stetige Erweiterung der entwickelten Ansätze und Lösungen identifiziert werden. Dies umfasst insbesondere die Weiterentwicklung und Spezifizierung der K-I-Kombinationsmatrix sowie der formulierten generellen Gestaltungsregeln. Ferner ist eine Anpassung der Software-Applikation *additiv-ID* im Sinne der Industrie 4.0 zu analysieren. Die Betrachtung von additiv gefertigten Baugruppen bildet aufbauend auf der vorliegenden Dissertation Potenzial für weitere Forschungsarbeiten.

Das in dieser Dissertation entwickelte Konzept stellt einen bauteilindividuellen und verfahrensspezifischen Kennzeichnungsansatz, bestehend aus Kennzeichnungsträger und Identifikator, für die Additive Fertigung ausgehend von anforderungs- und geometriebasierten Methoden zur Verfügung. Die Verwendung dieses Ansatzes bildet die Basis für eine durchgängige Identifikation in der bauteilindividuellen Additiven Fertigung. Eine industrielle Implementierung der entwickelten Methode und dem definierten Informationsmodell kann in der bauteilindividuellen Additiven Fertigung zur Verkürzung von Durchlaufzeiten, zur Reduktion von Iterationsschleifen sowie zum Wegfall von manuellen Tätigkeiten führen. Hierdurch erlangen Fertigungsunternehmen in der bauteilindividuellen Additiven Fertigung enorme Wettbewerbsvorteile.

9 Literatur

- [1] 3D Printing Systems Australia: Kevvox K-Studio software - 3D Printing Systems. URL: <http://3dprintingsystems.com/products/3d-printers/kevvox-3d-printers-overview/kevvox-k-studio-software/>. Abrufdatum 15.08.2017.
- [2] 3DSystems: ProX 500. SLS 3D Produktionsdrucker, Technische Produktdokumentation. Rock Hill, South Carolina, U.S. (2013).
- [3] 3MF Consortium: 3D Manufacturing Format. Core Specification & Reference Guide. URL: http://3mf.io/wp-content/uploads/2016/03/3MFcoreSpec_1.1.pdf. Abrufdatum 18.05.2017.
- [4] Abele, E.; Anderl, R.; Birkhofer, H.; Rüttinger, B. (Hrsg.): EcoDesign. Von der Theorie in die Praxis. Berlin, Heidelberg (2008).
- [5] Abele, E.; Kniepkamp, M.: Selektives Lasersintern. Technische Universität Darmstadt. Darmstadt (2015).
- [6] Adam, G. A.; Zimmer, D.: Design for Additive Manufacturing—Element transitions and aggregated structures. In: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 7 1, S. 20–28 (2014).
- [7] Adam, G. A. O.: Systematische Erarbeitung von Konstruktionsregeln für die additiven Fertigungsverfahren Lasersintern, Laserschmelzen und Fused Deposition Modeling, Dissertation, 1. Auflage (2015).
- [8] Adam, G. A. O.; Zimmer, D.: On design for additive manufacturing. Evaluating geometrical limitations. In: Rapid Prototyping Journal 21 6, S. 662–70 (2015).
- [9] Adobe: Adobe Photoshop CC - Drucken von 3D-Objekten. URL: <https://helpx.adobe.com/de/photoshop/using/print-3d-objects.html?set=photoshop--whats-new--2014-01>. Abrufdatum 15.08.2017.
- [10] AFNOR: Informationstechnik - Automatische Identifikation und Datenerfassungsverfahren - Spezifikation von Barcode-Symbologien - Code 39 ISO/IEC 16388. Genf (2004).
- [11] AFNOR: Informationstechnik - Automatische Identifikation und Datenerfassungsverfahren - Spezifikation der Barcode - Symbologie "QR Code" ISO/CEI 18004. Genf (2015).

- [12] Alexander, P.; Allen, S.; Dutta, D.: Part orientation and build cost determination in layered manufacturing. In: Computer-Aided Design 30 5, S. 343–56 (1998).
- [13] Allen, S.; Dutta, D.: Determination and evaluation of support structures in layered manufacturing: Journal of Design and Manufacturing (1995).
- [14] Allen, S.; Dutta, D.: On the Computation of Part Orientation Using Support Structures in Layered Manufacturing: Solid Freeform Fabrication Symposium (1994).
- [15] alma CAM Software: Nesting and cutting optimization software.
URL: <http://www.almacam.com/Products/Nesting-cutting-optimization-software>. Abrufdatum 15.08.2017.
- [16] Anderl, R.: Additive Manufacturing oder generative Fertigungsverfahren. vom Prototypen zur Massenfertigung? Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung. Hanau (2014).
- [17] Anderl, R.: Virtuelle Produktentwicklung C. Produkt- und Prozessmodellierung, Vorlesungsskript. Darmstadt (2017).
- [18] Anderl, R.; Arndt, A.: Prozesskette zur Additiven Fertigung. Technische Universität Darmstadt. Darmstadt (2016).
- [19] Anderl, R.; Gausemeier, J.; Schmidt, M.; Leyens, C.; Schmid, H.-J.; Seliger, G.; Winzer, P.: Additive Fertigung, Stellungnahme, 1. Auflage. München (2016).
- [20] Anderl, R.; Trippner, D.: STEP STandard for the Exchange of Product Model Data. Eine Einführung in die Entwicklung, Implementierung und industrielle Nutzung der Normenreihe ISO 10303 (STEP). Wiesbaden (2000).
- [21] Anitha, R.; Arunachalam, S.; Radhakrishnan, P.: Critical parameters in Fluencing the quality of prototypes in fused deposition modelling: Journal of Materials Processing Technology (2001).
- [22] Arndt, A.; Anderl, R.: Additive Manufacturing - Automation in Customized Production: 21° Seminário Internacional de Alta 2016 (2016).
- [23] Arndt, A.; Anderl, R.: Generative Fertigung. Handlungsbedarfe und entscheidungsgestützte Prüfung auf RPT-gerechte Konstruktion: Entwerfen Entwickeln Erleben 2014: Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Dresden, 26. - 27. Juni 2014 .

- [24] Arndt, A.; Anderl, R.: Integration einer Prüfmethode auf fertigungsgerechte Konstruktion für generative Fertigung in die virtuelle Produktentwicklung: 12. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2014 .
- [25] Arndt, A.; Anderl, R.; Hackbusch, H.: An Algorithm-based Method For Process-specific three-dimensional Nesting For Additive Manufacturing Processes: 26th Solid Freeform Fabrication Symposium 2015 .
- [26] Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K. (Hrsg.): Handbuch Logistik. Berlin (2008).
- [27] Ashenhurst, R. L.: Ontological aspects of information modeling. In: Minds and Machines 6 3, S. 287–394 (1996).
- [28] ASTM International: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies F2792 – 12. West Conshohocken, Pennsylvania, USA (2012).
- [29] ASTM International: Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology ISO/ASTM 52900:2015(E). West Conshohocken, Pennsylvania, USA (2016).
- [30] ASTM International: Specification for additive manufacturing file format (AMF) ISO/ASTM 52915:2016-02. West Conshohocken, Pennsylvania, USA (2016).
- [31] Aulbach, D.; Feike, F.; Klyn, C.; Laumann, D.; Röhm, B.; Sandner, S.: Untersuchung von Verfahren zur Identifikation additiv zu fertigender Bauteile, Advanced Research Project. Arndt, Alexander; Anderl, Reiner. Darmstadt (2017).
- [32] Aumund-Kopp, C.; Petzoldt, F.: Laser sintering of parts with complex internal structures. Lasersintern von Teilen mit komplexer innerer Struktur: International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials (PowderMet) (2008).
- [33] Autodesk, I.: Autodesk Netfabb 2017. Online Help. URL: <http://help.autodesk.com/view/NETF/2017/ENU/>. Abrufdatum 06.06.2017.
- [34] Balzert, H.; Ebert, C.: Softwaremanagement, 2. Aufl. Heidelberg (2008).
- [35] Balzert, H.; Liggesmeyer, P.: Lehrbuch der Softwaretechnik. Entwurf, Implementierung, Installation und Betrieb, 3. Aufl. Heidelberg (2011).
- [36] Bargel, H.-J.; Schulze, G. (Hrsg.): Werkstoffkunde. Berlin, Heidelberg (2012).

- [37] Bauer, D.; Borchers, K.; Burkert, T.; Ciric, D.; Cooper, F.; Ensthaler, J.; Gaub, H.; Gittel, H. J.; Grimm, T.; Hillebrecht, M.; Kluger, P. J.; Klöden, B.; Kochan, D.; Kolb, T.; Löber, L.; Lenz, J.; Marquardt, E.; Munsch, M.; Müller, A. K.; Müller-Lohmeier, K.; Müller-ter Jung, M.; Schaefflein, F.; Seidel, C.; Schwandt, H.; van de Vrie, R.; Witt, G.; Zäh, M.: *Handlungsfelder Additive Fertigungsverfahren*, 1. Auflage. Düsseldorf (2016).
- [38] Becker, J. (Hrsg.): *Prozessmanagement. Ein Leitfaden zur prozessorientierten Organisationsgestaltung* ; mit 41 Tabellen. Berlin (2005).
- [39] Behrens, B.-A.; Gastan, E.; Lange, F.: Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Kennzeichnung von Sinterteilen mittels gezielt eingebrachter Fremdpartikel. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 38 10, S. 816–20 (2007).
- [40] Bennell, J. A.; Oliveira, J. F.: The geometry of nesting problems. A tutorial. In: *European Journal of Operational Research* 184 2, S. 397–415 (2008).
- [41] Berger, U.; Hartmann, A.; Schmid, D.: *Additive Fertigungsverfahren. Rapid prototyping, rapid tooling, rapid manufacturing* ; mit Bilder-CD, 1. Aufl. Haan-Gruiten (2013).
- [42] Bittner, H. W.: *3D-Metall-Druck, Nachbearbeitung und Oberflächentechnik*. Arbeitsgemeinschaft Oberflächentechnik. Wien (2015).
- [43] Böge, A. (Hrsg.): *Vieweg Handbuch Maschinenbau. Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik* ; mit 441 Tabellen und mehr als 5000 Stichwörter. Wiesbaden (2007).
- [44] Bohnet, J.; Bernhardt, G.; Metzner, M.: Bessere Oberflächen auf Rapid Prototyping-Werkstücken. *Fraunhofer-Gesellschaft Bessere Oberflächen auf Rapid Prototyping-Werkstücken Verminderung der Baustufenstruktur auf lasergesinterten Rapid Prototyping-Bauteilen mittels Strahlverfahren: Galvanotechnik* (2008).
- [45] Booch, G.; Rumbaugh, J.; Jacobson, I.: *Das UML Benutzerhandbuch. Aktuell zur Version 2.0*. München (2006).
- [46] Breidt, A.; Choung, Z.; Heller, A.; Moos, Y.; Sprenger, E.; Stürmer, A.: *Untersuchung von Verfahren zur Kennzeichnung additiv zu fertigender Bauteile*, Advanced Research Project. Arndt, Alexander; Anderl, Reiner. Darmstadt (2017).

-
- [47] Breuninger, J.; Becker, R.; Wolf, A.; Rommel, S.; Verl, A.: Generative Fertigung mit Kunststoffen. Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern. Berlin, Heidelberg (2013).
- [48] British Standards Institution: Information technology. Automatic identification and data capture techniques. Bar code symbology specifications. Interleaved 2 of 5 ISO/IEC 16390. Genf (1999).
- [49] British Standards Institution: Informationstechnik. Automatische Identifikation und Datenerfassungsverfahren. Strichcode-Symbologie-Spezifizierung. Code 128 ISO/IEC 15417. Genf (2000).
- [50] British Standards Institution: Informationstechnik. Automatische Identifikation und Datenerfassungsverfahren. Spezifikationen für Strichcode-Symbologien. EAN/UPC ISO/IEC 15420. Genf (2010).
- [51] Buchbinder, D.; Meiners, W.: Generative Fertigung von Aluminiumbauteilen für die Serienproduktion. Projekt: AluGenerativ, Abschlussbericht. Aachen (2010).
- [52] Buchmann, J.: Einführung in die Kryptographie. Heidelberg (2010).
- [53] Bühring-Polaczek, A.; Michaeli, W.; Spur, G.: Handbuch Urformen, [vollst. überarb. Neuaufl.]. München (2014).
- [54] Burns, M.: Automated fabrication. Improving productivity in manufacturing. Englewood Cliffs, N.J (1993).
- [55] Business process management. BPM common body of knowledge - BPM CBOK ; Leitfaden für das Prozessmanagement ; Version 3.0. Gießen (2014).
- [56] Byun, H. S.; Lee, K. H.: Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 28 3-4, S. 307–13 (2006).
- [57] Canellidis, V.; Giannatsis, J.; Dedoussis, V.: Efficient parts nesting schemes for improving stereolithography utilization. In: Computer-Aided Design 45 5, S. 875–86 (2013).
- [58] Cheng, W.; Fuh, J.; Nee, A.; Wong, Y. S.; Loh, H. T.; Miyazawa, T.: Multi-objective optimization of part- building orientation in stereolithography. In: Rapid Prototyping Journal 1 4, S. 12–23 (1995).

- [59] Chennakesava, P.; Shivraj Narayan, Y.: Fused Deposition Modeling - Insights: International Conference on Advances in Design and Manufacturing ICAD&M 2014 (2014).
- [60] Chua, C. K.; Leong, K. F.; Lim, C. S.: Rapid prototyping. Principles and applications, 3. ed. Singapore (2010).
- [61] ConceptLaser: M2 cusing Multilaser. Metall-Laserschmelzanlage, Technische Produktspezifikation. Lichtenfels (2015).
- [62] Conrad, K.-J.: Grundlagen der Konstruktionslehre. Methoden und Beispiele für den Maschinenbau ; mit 103 Tabellen, zahlreichen Kenntnisfragen und Aufgabenstellungen mit Lösungen, 5., aktualisierte Aufl. München (2010).
- [63] Cormier, D.; Unnanon, K.; Sanii, E.: Specifying non-uniform cusp heights as a potential aid for adaptive slicing. In: Rapid Prototyping Journal 6 3, S. 204–12 (2000).
- [64] Craeghs, T.; Clijsters, S.; Kruth, J.-P.; Bechmann, F.; Ebert, M.-C.: Detection of Process Failures in Layerwise Laser Melting with Optical Process Monitoring. In: Physics Procedia 39, S. 753–59 (2012).
- [65] Danjou, S.: Mehrzieloptimierung der Bauteilorientierung für Anwendungen der Rapid-Technologie, Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2010, 1 // 1. Aufl. Göttingen (2010).
- [66] Danjou, S.; Köhler, P.: Ermittlung optimaler Bauteilorientierung zur Verbesserung der Prozessplanung in der CAD/RPKette: RTEjournal (2010).
- [67] Denkena, B. (Hrsg.): Die vernetzte Produktion. Forschungsergebnisse für die Praxis. Garbsen, Garbsen (2015).
- [68] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Strahlverfahrenstechnik: Begriffe, Einordnung der Strahlverfahren DIN 8200. Berlin (1982).
- [69] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Nummerung: Grundbegriffe DIN 6763. Berlin (1985).
- [70] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Schrift A für die maschinelle optische Zeichenerkennung; Zeichen und Nennmaße DIN 66008. Berlin (1989).
- [71] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Begriffe der Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen DIN EN 10052. Berlin (1994).
- [72] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Strichcodierung - Terminologie DIN 1556. Berlin (1998).

-
- [73] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Benutzer-orientierte Gestaltung interaktiver Systeme DIN EN ISO 13407. Berlin (2000).
- [74] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einleitung DIN 8580. Berlin (2003).
- [75] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 2: Füllen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe 8593-2. Berlin (2003).
- [76] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Fertigungsverfahren Spanen - Teil 0: Allgemeines - Einordnung, Unterteilung, Begriffe 8589-0. Berlin (2003).
- [77] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Fertigungsverfahren Spanen - Teil 1: Drehen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe 8589-1. Berlin (2003).
- [78] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Fertigungsverfahren Spanen - Teil 13: Hubschleifen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe 8589-13. Berlin (2003).
- [79] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Fertigungsverfahren Spanen - Teil 17: Gleitspanen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe 8589-17. Berlin (2003).
- [80] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Fertigungsverfahren Spanen - Teil 2: Bohren, Senken, Reiben - Einordnung, Unterteilung, Begriffe 8589-2. Berlin (2003).
- [81] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Fertigungsverfahren Spanen - Teil 3: Fräsen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe 8589-3. Berlin (2003).
- [82] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Fertigungsverfahren Spanen - Teil 11: Schleifen mit rotierendem Werkzeug - Einordnung, Unterteilung, Begriffe 8589-11. Berlin (2003).
- [83] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Informationstechnik - Alphanumerischer Bildzeichensatz für optische Zeichenerkennung OCR-B - Formen und Abmessungen des gedruckten Bildes DIN EN 14603. Berlin (2005).
- [84] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: AutoID-Technologien - Symbolologiespezifikationen - Code 16K DIN EN 12323. Berlin (2005).
- [85] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung DIN EN ISO 9241-110. Berlin (2008).

- [86] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Informationstechnik - Automatische Identifikation und Datenerfassungsverfahren - Leistungsanforderungen an Strichcode-Scanner und -Decoder DIN EN ISO/IEC 15423. Berlin (2010).
- [87] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Informationstechnik - Verfahren der automatischen Identifikation und Datenerfassung - Spezifikation der Strichcodesymbologie PDF417 DIN EN ISO/IEC 15438. Berlin (2012).
- [88] Dobkin, D. M.; Zuraw, M. K.: Principles of chemical vapor deposition. [what's going on inside the reactor]. Dordrecht (2003).
- [89] Dobler, H.-D.: Fachkunde Metall, 54., neu bearb. Aufl., 6. Dr. Haan-Gruiten (2004).
- [90] Dreher, S.: Flexible Integration von Rapid Prototyping Prozessketten in die Produktentstehung, Dissertation. Meyer, Hans Jürgen, 1. Auflage. Berlin (2005).
- [91] Dudenredaktion: Duden. Deutsches Universalwörterbuch ; das umfassende Bedeutungswörterbuch der deutschen Gegenwartssprache, 8. Auflage. Berlin (2015).
- [92] Dumas, J.; Hergel, J.; Lefebvre, S.: Bridging the gap. In: ACM Transactions on Graphics 33 4, S. 1–10 (2014).
- [93] Efficient Software Limited Chelsea House: Software für automatisches Nesting. URL: <http://www.nestfab.com/>. Abrufdatum 15.08.2017.
- [94] Elmasri, R. A.; Navathe, S. B.; Shafir, A.: Grundlagen von Datenbanksystemen, Bachelorausg., 3., aktualisierte Aufl., [Nachdr.]. München (2011).
- [95] Ewins, D. J.: Modal testing. Theory, practice and application, 2. ed. Bal-dock (2000).
- [96] Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI): Gutachten 2015. 2015. Berlin (2015).
- [97] Fastermann, P.: 3D-Druck/Rapid Prototyping. Eine Zukunftstechnologie - kompakt erklärt. Berlin, Heidelberg (2012).
- [98] Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. Berlin, Heidelberg (2013).
- [99] Feldmann, K.; Schöppner, V.; Spur, G. (Hrsg.): Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren. München (2014).

-
- [100] Finkenzeller, K.: RFID-Handbuch. Grundlagen und praktische Anwendungen induktiver Funkanlagen, Transponder und kontaktloser Chipkarten, 4. aktualisierte u. erw. Aufl. München (2006).
- [101] Fischermanns, G.: Praxishandbuch Prozessmanagement. Das Standardwerk auf Basis des BPM Framework ibo-Prozessfenster®, 11., bearbeitete Auflage. Gießen (2013).
- [102] Frank, D.; Fadel, G.: Expert system-based selection of the preferred direction of build for rapid prototyping processes. In: Journal of Intelligent Manufacturing 6 5, S. 339–45 (1995).
- [103] Fraunhofer-Institut für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen SCAI: PackAssistant – Optimierte 3D-Verpackungsplanung. URL: <http://www.packassistant.de/>. Abrufdatum 15.08.2017.
- [104] Friessnig, M.; Kleindienst, M.; Ramsauer, C.; Urch, T.: Laserschmelzverfahren in der automobilen Zulieferindustrie. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 110 12, S. 823–26 (2015).
- [105] Fritz, A. H.; Schulze, G.: Fertigungstechnik, 10., neu bearb. Aufl. 2012. Berlin, Heidelberg (2012).
- [106] Fröbel, T.; Stein, P.: Die Kopplung von Partialmodellen aus Sicht der Informatik. Bewertung gekoppelter numerischer Partialmodelle im Konstruktiven Ingenieurbau, Bd. 88. Berlin (2011).
- [107] Galantucci, L. M.; Lavecchia, F.; Percoco, Gianluca: Study of compression properties of topologically optimized FDM made structured parts: CIRP Annals - Manufacturing Technology (2008).
- [108] Galantucci, L. M.; Lavecchia, F.; Percoco, G.: Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 58 1, S. 189–92 (2009).
- [109] Gebhardt, A.: Rapid prototyping. Werkzeuge für die schnelle Produktentstehung, 2., völlig überarb. Aufl. München (2000).
- [110] Gebhardt, A.: Additive Fertigungsverfahren. Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion, 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. München (2016).
- [111] General Dynamics Land Systems: Supplier Instruction For Item Unique Identification (IUID) Marking, Guideline. Sterling Heights, Michigan, U.S. (2015).

- [112] Gibson, I.; Rosen, D. W.; Stucker, B.: Additive Manufacturing Technologies. Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. Boston, MA (2010).
- [113] Giesler, S.: Technische Verfahrensoptimierung und Einsparung von Hilfsstoffen beim Gleitschleifen: Tagungsband Gleitschleiftechnik (1997).
- [114] Goldstein, H.; Poole, C. P.; Safko, J. L., SR.: Klassische Mechanik, 3rd ed. Hoboken (2012).
- [115] Govett, T.; Kim, K.; Lundin, M.; Pinero, D.: Design Rules For Selective Laser Sintering, Projektbericht, 1. Auflage. Austin, Texas (2012).
- [116] Govett, T.; Kim, K.; Lundin, M.; Pinero, D.: Design Rules For Selective Laser Sintering, Mechanical Engineering Design Projects Program. Austin, Texas (2012).
- [117] Grimm, T.: Fused Deposition Modeling: A Technology Evaluation, White Paper. Edgewood, KY, USA (2002).
- [118] Grote, K.-H.; Feldhusen, J.: Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau, 22. Aufl. s.l. (2007).
- [119] Günthner, W. A.: Definition Identifikationssystem, Websiteeintrag. URL: http://www.fml.mw.tum.de/fml/index.php?Set_ID=945&letter=I&title=Identifikationssystem. Abrufdatum 30.05.2017.
- [120] Hagl, R.: Das 3D-Druck-Kompendium. Leitfaden für Unternehmer, Berater und Innovationstreiber, 2. Aufl. Wiesbaden (2015).
- [121] Harris, S.: CISSP exam guide. [complete coverage of all 10 Certified Information Systems Security Professional domains ; ideal as both a study tool and an on-the-job IT security reference ; filled with practice exam questions and in-depth explanations], 5. ed. New York, NY (2011).
- [122] Hartmann, W.; Hausotte, T.; Drummer, D.; Wudy, K.: Anforderungen und Randbedingungen für den Einsatz optischer Messsysteme zur In-Line-Prüfung additiv gefertigter Bauteile: RTejournal .
- [123] He, J.; Fu, Z.-F.: Modal analysis, 1. publ. Oxford (2001).
- [124] Heidemann, B.: Trennende Verknüpfung. Ein Prozessmodell als Quelle für Produktideen, Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2001, Als Ms. gedr. Düsseldorf (2001).

-
- [125] Helmus, M. e. a.: RFID in der Baulogistik. Forschungsbericht zum Projekt Integriertes Wertschöpfungsmodell mit RFID in der Bau- und Immobilienwirtschaft, 1. Aufl. s.l. (2009).
- [126] Hippenmeyer, H.: Automatische Identifikation für Industrie 4.0. Berlin, Heidelberg (2016).
- [127] Hoeren, K. P. J.; Witt, G. (Hrsg.): Konstruktive Möglichkeiten und verfahrensspezifische Grenzen in der additiven Fertigung (2012).
- [128] Hoffmann, H.; Spur, G.; Neugebauer, R.: Handbuch Umformen, [2., vollst. neu bearb. Aufl.]. s.l. (2012).
- [129] Hompel, M. ten; Büchter, H.; Franzke, U.: Identifikationssysteme und Automatisierung. Berlin, Heidelberg (2008).
- [130] Hühnlein, D.: Identitätsmanagement. In: Datenschutz und Datensicherheit - DuD 32 3, S. 161–63 (2008).
- [131] IFUM – Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen: Sinterbauteile manipulationssicher markieren. URL: https://www.blechrohrepro-file.de/blechumformtechnik-fachartikel/sinterbauteile-manipulationssicher-markieren_5452_de/. Abrufdatum 31.05.2017.
- [132] ISO International Organization for Standardization: Informationstechnik - Internationale Symbologie-Spezifizierung - Daten-Matrix ISO/IEC 16022. Genf (2006).
- [133] ISO International Organization for Standardization: Information technology - Radio frequency identification for item management - Part 1: Reference architecture and definition of parameters to be standardized ISO/IEC 18000-1. Genf (2008).
- [134] ISO International Organization for Standardization: Industrial automation systems and integration - JT file format specification for 3D visualization ISO 14306:2012. Genf (2012).
- [135] ISO International Organization for Standardization: Additive manufacturing - General principles - Part 2: Overview of process categories and feedstock ISO 17296-2:2015. Genf (2015).
- [136] Jaeger, R. C.: Introduction to microelectronic fabrication, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ (2002).

- [137] Jahnke, U.; Bornefeld, P. A.; Koch, R.: Production-integrated Markings for Traceability of AM Parts in the Context of Industry 4.0: 27th Solid Freeform Fabrication Symposium (2016).
- [138] Jünemann, R.; Beyer, A.: Steuerung von Materialfluß- und Logistiksystemen. Informations- und Steuerungssysteme, Automatisierungstechnik. Berlin, Heidelberg (1998).
- [139] Kaddar, W.: Die generative Fertigung mittels Laser-Sintern. Scanstrategien, Einflüsse verschiedener Prozessparameter auf die mechanischen und optischen Eigenschaften beim LS von Thermoplasten und deren Nachbearbeitungsmöglichkeiten, Dissertation. Witt, Gerd. Duisburg (2010).
- [140] Kaddar, W.; Witt, G.: Die Festigkeit in Abhängigkeit von Scanstrategien & -optionen beim Lasersintern vom Kunststoff: RTejournal (2010).
- [141] Kahnert, M.: Scanstrategien zur verbesserten Prozessführung beim Elektronenstrahlschmelzen (EBM), Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2014. München (2015).
- [142] Kai, C. C.; Jacob, G. G. K.; Mei, T.: Interface between CAD and Rapid Prototyping systems. Part 1. A study of existing interfaces. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 13 8, S. 566–70 (1997).
- [143] Kai, C. C.; Jacob, G. G. K.; Mei, T.: Interface between CAD and Rapid Prototyping systems. Part 2. LMI ? An improved interface. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 13 8, S. 571–76 (1997).
- [144] Kamrani, A. K.; Nasr, E. A. (Hrsg.): Rapid prototyping. Theory and practice. New York, N.Y (2006).
- [145] Karapatis, N. P.; Guidoux, Y.; Gygax, P. E.; Glardon, R.: Thermal Behavior of Parts Made by Direct Metal Laser Sintering: Solid Freeform Fabrication Symposium (1998).
- [146] Kazakos, W.; Schmidt, A.; Tomczyk, P.: Datenbanken und XML. Konzepte, Anwendungen, Systeme. Berlin, Heidelberg (2002).
- [147] Kern, C.: Anwendung von RFID-Systemen. Mit 24 Tabellen, 2., verb. Aufl. Berlin (2007).
- [148] Kienel, G.: Vakuumbeschichtung. Band 2: Verfahren und Anlagen, VDI-Buch. Berlin (1997).

- [149] Kleuker, S.: Grundkurs Software-Engineering mit UML. Der pragmatische Weg zu erfolgreichen Softwareprojekten, 3., korr. und erw. Aufl. 2013. Wiesbaden, s.l. (2013).
- [150] Klocke, F.: Fertigungsverfahren 5. Gießen, Pulvermetallurgie, Additive Manufacturing, 4. Auflage. Berlin, Heidelberg (2015).
- [151] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 2. Schleifen, Honen, Läppen, 4., neu bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg (2005).
- [152] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 4. Umformen, 5., neu bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg (2006).
- [153] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 1. Drehen, Fräsen, Bohren, 8 Aufl. Berlin, Heidelberg (2008).
- [154] Knowledge Based Systems, I.: IDEF - Integrated DEfinition Methods. URL: http://www.idef.com/idefo-function_modeling_method/. Abrufdatum 18.08.2017.
- [155] Krassenstein, E.: 3DPrintTech: Free Software Released to 3D Print Objects Larger than Printer's Build Volume (2014).
- [156] Kruth, J. P.; Froyen, L.; van Vaerenbergh, J.; Mercelis, P.; Rombouts, M.; Lauwers, B.: Selective laser melting of iron-based powder. In: Journal of Materials Processing Technology 149 1-3, S. 616–22 (2004).
- [157] Kruth, J.-P.; Leu, M. C.; Nakagawa, T.: Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 47 2, S. 525–40 (1998).
- [158] Kulkarni, P.; Dutta, D.: An accurate slicing procedure for layered manufacturing. In: Computer-Aided Design 28 9, S. 683–97 (1996).
- [159] Lachmayer, R.; Lippert, R. B.; Fahlbusch, T. (Hrsg.): 3D-Druck beleuchtet. Additive Manufacturing auf dem Weg in die Anwendung. Berlin, Heidelberg (2016).
- [160] Langefeld, B.: Additive manufacturing. A game changer for the manufacturing industry? München (2013).
- [161] Langefeld, B.: Marktchancen und Potentiale des Additive Manufacturing. VDMA Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. Denkendorf (2014).
- [162] Langer, J.; Roland, M.: Anwendungen und Technik von Near Field Communication (NFC). Berlin, Heidelberg (2010).

- [163] Leibrecht, S.: Information Model for the Integration of Ecological Assessments into Virtual Product Development, Dissertation. Aachen (2004).
- [164] Lenk, B.: Handbuch der automatischen Identifikation. 2D-Codes, 1. Aufl., 1. Tsd., Stand: 1. Juli 2002. Kirchheim unter Teck (2002).
- [165] Lenk, B.: Handbuch der automatischen Identifikation. ID-Techniken, 1D-Codes, 2D-Codes und 3D-Codes, 3. Aufl., Stand: 01.Dez. 2007. Kirchheim unter Teck (2007).
- [166] Leong, K. F.; Chua, C. K.; Ng, Y. M.: A study of stereolithography file errors and repair. Part 1. Generic solution. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 12 6, S. 407–14 (1996).
- [167] Leong, K. F.; Chua, C. K.; Ng, Y. M.: A study of stereolithography file errors and repair. Part 2. Special cases. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 12 6, S. 415–22 (1996).
- [168] Liu, F.; Zhou, H.; Li, D.: Repair of STL errors. In: International Journal of Production Research 47 1, S. 105–18 (2009).
- [169] Lolling, A.: Identifikationssysteme in der Logistik. Übersicht und praxisorientierte Auswahl. München (2003).
- [170] Majhi, J.; Janardan, R.; Schwerdt, J.; Smid, M.; Gupta, P.: Minimizing support structures and trapped area in two-dimensional layered manufacturing. In: Computational Geometry 12 3-4, S. 241–67 (1999).
- [171] Mani, K.; Kulkarni, P.; Dutta, D.: Region-based adaptive slicing. In: Computer-Aided Design 31 5, S. 317–33 (1999).
- [172] Martha, A. M.: Optimierung des Produktentwicklungsprozesses durch CAD-CAM-Integration im Kontext der additiven Fertigung, Dissertation. Köhler, Peter. Duisburg (2015).
- [173] Martha, A. M.; Köhler, P.: Ansätze zur Verbesserung von Qualität und Wirtschaftlichkeit bei generativen Verfahren durch Optimierung des Pre-Processes: RTejournal (2011).
- [174] Materialise: Materialise Software. Magics 20 Schnelleinstieg & Magics 19 Benutzerhandbuch, Benutzerhandbuch. Leuven, Belgien (2016).
- [175] Mattox, D. M.: Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing, 2nd ed. Oxford, UK (2010).

- [176] Möhrle, M.; Emmelmann, C.: Fabrikstrukturen für die additive Fertigung. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 111 9, S. 505–09 (2016).
- [177] Müller, K.-P.: Praktische Oberflächentechnik. Vorbehandeln, beschichten, Beschichtungsfehler, Umweltschutz : mit 72 Tabellen, 4., überarb. Aufl. Braunschweig (2003).
- [178] Nacke, B.; Baake, E. (Hrsg.): Induktives Erwärmen. Wärmen, Härten, Glühen, Löten, Schweißen. Essen (2014).
- [179] Natke, H. G.: Einführung in Theorie und Praxis der Zeitreihen- und Modalanalyse. Identifikation schwingungsfähiger elastomechanischer Systeme, 2., verbesserte Auflage. Wiesbaden (1988).
- [180] Nolting, W.: Grundkurs Theoretische Physik 1. Klassische Mechanik, 9., aktualisierte Aufl. Berlin, Heidelberg (2011).
- [181] Oestereich, B.; Bremer, S.: Analyse und Design mit der UML 2.5. Objekt-orientierte Softwareentwicklung ; [inkl. Poster mit UML-Notationsübersicht], 10., aktualisierte und erw. Aufl. München (2012).
- [182] Pandey, P. M.; Venkata Reddy, N.; Dhande, S. G.: Improvement of surface finish by staircase machining in fused deposition modeling. In: Journal of Materials Processing Technology 132 1-3, S. 323–31 (2003).
- [183] Pandey, P. M.; Venkata Reddy, N.; Dhande, S. G.: Part deposition orientation studies in layered manufacturing. In: Journal of Materials Processing Technology 185 1-3, S. 125–31 (2007).
- [184] Pätzold, B.: Integration rechnerunterstützter Verfahren für die Konstruktion auf der Basis eines objektorientierten Produktmodellansatzes, Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 1991, Als Ms. gedr. Düsseldorf (1991).
- [185] Paucksch, E.; Holsten, S.; Linß, M.; Tikal, F.: Zerspantechnik. Prozesse, Werkzeuge, Technologien ; mit 45 Tabellen, 12., vollst. überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden (2008).
- [186] Peters, S.: Additive Fertigung. Der Weg zur individuellen Produktion: Schriftenreihe der Technologielinie Hessen-Nanotech (2015).
- [187] Ponche, R.; Kerbrat, O.; Mogno, P.; Hascoet, J.-Y.: A novel methodology of design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing process. In: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 30 4, S. 389–98 (2014).

- [188] Pötter, M.; Jesse, R.: Barcode, Einführung und Anwendungen, 2., aktualisierte und überarb. Aufl. Kaarst (1998).
- [189] Pribe, J. D.; West, B. M.; Gegel, M.; Hartwig, T.; Lunn, T.; Brown, B.; Bristow, D. A.; Landers, R. G.; Kinzel, E. C.: Modal Response as a Validation Technique for Metal Parts Fabricated with Selective Laser Melting: Solid Freeform Fabrication Symposium (2016).
- [190] Prüller, H.: Praxiswissen Gleitschleifen. Leitfaden für die Produktionsplanung und Prozessoptimierung, 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden (2015).
- [191] Pütter, C.: Kooperative Informationsmodellierung: Grundlegende methodische und informationstechnologische Aspekte, Dissertation. Anderl, Reiner. Darmstadt (2000).
- [192] Raja, V.; Fernandes, K. J. (Hrsg.): Reverse Engineering. An Industrial Perspective. London (2008).
- [193] Rehme, O.; Emmelmann, C.; Morlock, M. M.: Cellular design for laser freeform fabrication, Zugl.: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Inst. für Laser- und Anlagensystemtechnik, Diss., 2009, 1. Aufl. Göttingen (2010).
- [194] Reinhardt, T.; Witt, G.: Ansätze zur Qualitätsbewertung von generativen Fertigungsverfahren durch die Einführung eines Kennzahlensystems: RTEjournal (2012).
- [195] Richard, H. A.; Schramm, B.; Zipsner, T. (Hrsg.): Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen. Wiesbaden, s.l. (2017).
- [196] Rieg, F.; Steinhilper, R. (Hrsg.): Handbuch Konstruktion. München (2012).
- [197] Riemer, A.; Richard, H. A.; Schramm, B.: Ermüdungseigenschaften von additiv gefertigten Titanstrukturen im Hinblick auf den Einsatz im menschlichen Körper: RTEjournal (2015).
- [198] Robertson, S.; Robertson, J.: Mastering the requirements process. Getting requirements right, 3rd ed. Upper Saddle River, N.J (2013).
- [199] Ross, D. T.: Structured Analysis (SA). A Language for Communicating Ideas. In: IEEE Transactions on Software Engineering SE-3 1, S. 16–34 (1977).
- [200] Rother, H.: 3D-Drucken...und dann? Weiterbearbeitung, Verbindung & Veredelung von 3D-Druck-Teilen. München (2017).

-
- [201] Rupp, C.: Requirements-Engineering und -Management. Professionelle, iterative Anforderungsanalyse für die Praxis, 5., aktualisierte und erw. Aufl. München (2009).
- [202] Saake, G.; Schmitt, I.; Türker, C.: Objektdatenbanken. Konzepte, Sprachen, Architekturen, 1. Aufl. Bonn (1997).
- [203] Sabourin, E.; Houser, S. A.; Helge Bøhn, J.: Accurate exterior, fast interior layered manufacturing. In: Rapid Prototyping Journal 3 2, S. 44–52 (1997).
- [204] Schäfer, R.: Design Guidelines for Rapid Prototyping Entwicklung von Konstruktionsrichtlinien für ein fertigungsgerechtes Gestalten anhand des Fused Deposition Modeling, Master Thesis. Hennings, Dirk. Bremen (2008).
- [205] Scheithauer, G.: Zuschnitt- und Packungsoptimierung. Problemstellungen, Modellierungstechniken, Lösungsmethoden. Wiesbaden (2008).
- [206] Schillen, V.: Erzeugung hochgenauer Schichtzerlegungen von 3D-Modellen für den Einsatz in Rapid-Prototyping-Anwendungen, Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2001, Als Ms. gedr. Berlin (2002).
- [207] Schmelzer, H. J.; Sesselmann, W.: Geschäftsprozessmanagement in der Praxis. Produktivität steigern, Wert erhöhen, Kunden zufrieden stellen, 4., erw. Aufl. München (2004).
- [208] Schmid, M.: Additive Fertigung mit selektivem Lasersintern (SLS). Prozess- und Werkstoffüberblick. Wiesbaden (2015).
- [209] Schmidt, M.; Simon, C.; Levy, G. N.: FINISHING OF SLS-PARTS FOR RAPID MANUFACTURING (RM). A Comprehensive Approach: Solid Freeform Fabrication Symposium (2009).
- [210] Schneider, D.: Wärmebehandlung in der Additiven Fertigung: X-Technik Additive Fertigung (2016).
- [211] Seemann, J.; Gudenberg, J. W. v.: Software-Entwurf mit UML 2. Objekt-orientierte Modellierung mit Beispielen in Java, 2. Auflage. Berlin, Heidelberg (2006).
- [212] Seepersad, C. C.; Govett, T.; Kim, K.; Lundin, M.; Pinero, D.: A DESIGNER'S GUIDE FOR DIMENSIONING AND TOLERANCING SLS PARTS: Solid Freeform Fabrication Symposium (2012).

- [213] Sehrt, J. T.: Möglichkeiten und Grenzen bei der generativen Herstellung metallischer Bauteile durch das Strahlschmelzverfahren. Witt, Gerd. Aachen (2010).
- [214] Sehrt, J. T.: Direct Slicing Approach For The Production Of Perfused Components By Laser Beam Melting. In: The South African Journal of Industrial Engineering 25 1, S. 96 (2014).
- [215] Simplify3d: Software Simplify3d. URL: <https://www.simplify3d.com/>. Abrufdatum 15.08.2017.
- [216] Singhal, S. K.; Jain, P. K.; Pandey, P. M.; Nagpal, A. K.: Optimum part deposition orientation for multiple objectives in SL and SLS prototyping. In: International Journal of Production Research 47 22, S. 6375–96 (2009).
- [217] Smith, D. L.: Thin-film deposition. Principles and practice, Internat. ed. Boston, Mass. (1995).
- [218] Spur, G.: Handbuch Wärmebehandeln und Beschichten, 1. Aufl. s.l. (2015).
- [219] Spur, G.; Krause, F.-L.: Das virtuelle Produkt. Management der CAD-Technik. München (1997).
- [220] Spur, G.; Stöferle, T.: Abtragen, Beschichten. München (1987).
- [221] Stachowiak, H.: Allgemeine Modelltheorie. Wien (1973).
- [222] Staud, J. L.: Datenmodellierung und Datenbankentwurf, 1. Aufl. s.l. (2005).
- [223] Stein, P.; Lahmer, T.; Bock, S.: Synthese und Analyse von gekoppelten Modellen im konstruktiven Ingenieurbau: Bautechnik Sonderdruck (2011).
- [224] Stoffregen, H. A.: Strukturintegration piezoelektrischer Vielschichtaktoren mittels selektiven Laserschmelzens, Dissertation (2015).
- [225] Strano, G.; Hao, L.; Everson, R. M.; Evans, K. E.: A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 66 9-12, S. 1247–54 (2013).
- [226] Stratasys: Dimension Elite. THINK IN 3D AND GIVE YOUR IDEAS NEW DIMENSION., Technische Produktspezifikation. Eden Prairie, MN (2013).
- [227] Stroud, I.: Boundary Representation Modelling Techniques. London (2006).

-
- [228] Sweeney, P. E.; Paternoster, E. R.: Cutting and Packing Problems. A Categorized, Application-Orientated Research Bibliography. In: The Journal of the Operational Research Society 43 7, S. 691 (1992).
- [229] Thilow, A. P.: Entgrattechnik. Entwicklungsstand und Problemlösungen, 3., verb. Aufl. Renningen (2008).
- [230] Thomas, D.: The Development of Design Rules for Selective Laser Melting, Dissertation. Millward, Huw; Bibb, Richard; Lewis, Alan. Cardiff (2009).
- [231] Trenke, D.: Infiltration von lasergesinterten Bauteilen, 25. Auflage. Clausthal (2000).
- [232] Trippner, D.: Vorgehensmodell zum Management von Produktdaten in komplexen und dynamischen Produktentwicklungsprozessen, Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2002. Aachen (2002).
- [233] Vajna, S.; Bley, H.; Hehenberger, P.; Weber, C.; Zeman, K.: CAx für Ingenieure. Eine praxisbezogene Einführung, 2., völlig neu bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg (2009).
- [234] Venuvinod, P. K.; Ma, W.: Rapid Prototyping. Laser-based and Other Technologies. Boston, MA (2004).
- [235] Verein Deutscher Ingenieure: Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren. Vereinfachte Kostenermittlung VDI 2225-1. Berlin (1997).
- [236] Verein Deutscher Ingenieure: Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren. Technisch-wirtschaftliche Bewertung VDI 2225-3. Berlin (1998).
- [237] Verein Deutscher Ingenieure: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme VDI 2206. Berlin (2004).
- [238] Verein Deutscher Ingenieure: Generative Fertigungsverfahren - Rapid-Technologien (Rapid Prototyping): Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen VDI 3404. Berlin (2009).
- [239] Verein Deutscher Ingenieure: Additive Fertigungsverfahren: Strahlschmelzen metallischer Bauteile - Qualifizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung VDI 3405 Blatt 2. Berlin (2013).

- [240] Verein Deutscher Ingenieure: Additive Fertigungsverfahren, Rapid Manufacturing: Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen, Güteüberwachung VDI 3405 Blatt 1. Berlin (2013).
- [241] Verein Deutscher Ingenieure: Additive Fertigungsverfahren. Statusreport. Düsseldorf (2014).
- [242] Verein Deutscher Ingenieure: Additive Fertigungsverfahren: Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen VDI 3405. Berlin (2014).
- [243] Verein Deutscher Ingenieure: Betriebsdatenerfassung und Identifikation. Identifikationssysteme VDI 4416. Düsseldorf (2015).
- [244] Verein Deutscher Ingenieure: Additive Fertigungsverfahren: Laser-Strahlschmelzen metallischer Bauteile - Materialkennndatenblatt Aluminiumlegierung AlSi10Mg VDI 3405 Blatt 2.1. Berlin (2015).
- [245] Verein Deutscher Ingenieure: Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen VDI 3405 Blatt 3. Berlin (2015).
- [246] Virnich, M.; Posten, K.: Handbuch der codierten Datenträger. Identifikationssysteme für Produktion, Logistik, Handel und Dienstleistung. Köln (1992).
- [247] Wartzack, S.; Drummer, D.; Wittmann, S.; Stuppy, J.; Rietzel, D.; Tremmel, S.; Kühnlein, F.: Besonderheiten bei der Auslegung und Gestaltung laser-gesinterter Bauteile: RTejournal (2010).
- [248] Wegner, A.; Witt, G.: Konstruktionsregeln für das Laser-Sintern. In: Zeitschrift Kunststofftechnik 2012 8, S. 252–77 (2012).
- [249] Weikiens, T.: Systems engineering mit SysML/UML. Modellierung, Analyse, Design, 1. Aufl. Heidelberg (2006).
- [250] Weitzmann, O.: Informationsmodell zur Repräsentation technischer Oberflächen zur Unterstützung der virtuellen Produktentwicklung, Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2014. Aachen (2014).
- [251] Wendel, B.: Prozessuntersuchung des "Fused Deposition Modeling", Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2009. Erlangen (2009).
- [252] Westmoreland: Unique Item Identification (UID). Strategy for Satisfying Technical Documentation Requirements. Orlando, Florida (2010).
- [253] Wölker, M.: Automatische Identifikationssysteme, Vorlesung 4. Quartester. Venlo (2015).

- [254] Wüstneck, K. D.: Zur philosophischen Verallgemeinerung und Bestimmung des Modellbegriffs: Deutsche Zeitschrift für Philosophie (1963).
- [255] Yang, Z. Y.; Chen, Y. G.; Sze, W. S.: Layer-based machining. Recent development and support structure design. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 216 7, S. 979–91 (2016).
- [256] Zäh, M. F.: Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien. Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren, unveränderter Nachdruck der 1. Aufl. 2006. München (2013).
- [257] Zein, I.; Hutmacher, D. W.; Tan, K. C.; Teoh, S. H.: Fused deposition modeling of novel scaffold architectures for tissue engineering applications. In: Biomaterials 23 4, S. 1169–85 (2002).
- [258] Zeyn, H.: Industrialisierung der Additiven Fertigung. Digitalisierte Prozesskette - von der Entwicklung bis zum einsetzbaren Artikel, 1. Auflage (2017).
- [259] Zimmer, D.; Adam, G. A. O.: Konstruktionsregeln für Additive Fertigungsverfahren. Design Rules for Additive Manufacturing: Konstruktion - Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe (2013).
- [260] Zope Foundation: ZODB - a native object database for Python.
URL: <http://www.zodb.org/en/latest/>. Abrufdatum 02.10.2017.

10 Anhang

10.1 Ausgefüllte universale K-I-Kombinationsmatrix

Für die in Tabelle 10-2 ausgefüllten Attributwerte in der K-I-Kombinationsmatrix sind folgende Anmerkungen zu beachten.

Der Attributwert für A_1 (Auslesedauer) ist abhängig von dem eingesetzten Kennzeichnungsträger, wird dieser spätestens nach dem Post-Prozess entfernt, so ist mit der jeweiligen Kombination kein lebenslanges Auslesen möglich.

Die Attributwerte für A_2 und A_3 (Menschen- und Maschinenlesbarkeit) sind abhängig vom eingesetzten Identifikator der jeweiligen K-I-Kombination.

Der Attributwert für A_4 (Additives Fertigungsverfahren) ist von Kennzeichnungsträger und Identifikator abhängig.

- volumenintegrierte Hohlraumeinbringung (K_1) ist nur bei FDM und SLS möglich, da metallische Werkstoffe es nicht erlauben innenliegende Strukturen zerstörungsfrei auszulesen.
- EAN-Code (I_2) und QR-Code (I_4) sind bei metallischen Werkstoffen aufgrund des schlechteren Kontrastes zwischen den Identifikatorelementen nicht möglich. Ansonsten sind die Identifikatorarten bei allen Verfahren umsetzbar, das passende Identifikationssystem vorausgesetzt.

Der Attributwert für A_5 (Nachbearbeitungsverfahren) ist insbesondere vom Kennzeichnungsträger abhängig. Lediglich der Identifikator I_5 (RFID/NFC) ist ebenfalls ausschlaggebend.

- Die Verwendung von RFID-/NFC-Transpondern (I_5) schließt das Anwenden von thermischen Nachbearbeitungsverfahren (NBV8 und NBV9), dies gilt auch für das chemische Stützenentfernen (NBV2) und Infiltrieren (NBV6).
- Die Kennzeichnungsträger K_4 und K_5 ermöglichen kein Lackieren, da Bauteilstellen nicht komplett zugänglich sind, entweder durch einen Käfig (K_5) oder an der Anschlussstelle eines Fähhchens (K_4).

- Der Kennzeichnungsträger der Materialextusion (K_3) eignet sich nicht fürs Strahlen (NBV4) und Gleitschleifen (NBV5), da die Extrusionen stark abgerundet werden können und ein Auslesen hierdurch verhindert werden kann.
- Der Kennzeichnungsträger K_5 erschwert zusätzlich das Druckluftreinigen (NBV3) und Strahlen (NBV4) sowie Gleitschleifen (NBV5) von Bauteilen. Außerdem ist nur ein chemisches Entstützen möglich (NBV2).
- Bei der oberflächenintegrierten Materialintrusion (K_2) sollte auf eine Lackierung verzichtet werden, da diese Vertiefungen füllen kann und somit die Identifikatoren nicht auslesbar sind, ähnliches gilt für die Hohlraum-einbringung (K_1), das Auslesen im Hohlraum befindlicher Identifikatoren erfordert eine leichte Transparenz zwischen Oberfläche und Hohlraum (dies gilt nicht bei RFID/NFC).
- Die Nachbearbeitungsverfahren NBV8 und NBV9 (thermische Wärmebehandlungen) werden bei Kombinationen, wo kein SLM möglich ist, nicht mit aufgeführt.

Die Attributwerte für die Attribute A_6 bis A_7 aus der Bauteilgeometrie sind alle abhängig vom Kennzeichnungsträger.

Die wirtschaftliche Wertigkeit $K_{F,i,j}$ für den relativen Vergleich von mehreren K-I-Kombinationen erfolgt nach VDI 2225 und errechnet sich durch:

$$K_{F,i,j} = \frac{\text{Punktsumme } K_{i,j}}{\text{ideale Punktsumme}} \text{ mit } i = 1, \dots, m \text{ und } j = 1, \dots, n$$

Zur Punktevergabe werden folgende Bewertungskriterien eingesetzt, siehe nachstehende Tabelle.

Tabelle 10-1: Bewertungskriterien zur Bestimmung der wirtschaftlichen Wertigkeit

	0	1	2	3	4
Geringe Fertigungsaufwände	Sehr hohe Mehraufwände	Hohe Mehraufwände	Geringe Mehraufwände	Keine Mehraufwände	Reduzierung der Aufwände
Geringer Materialeinsatz	Hoher zusätzlicher Materialeinsatz	Geringer zusätzlicher Materialeinsatz	Kein zusätzlicher Materialaufwand	Geringe Minimierung des Materialeinsatzes	Hohe Minimierung des Materialeinsatzes
Geringe Kosten für Identifikation	Sehr hohe Mehrkosten	Hohe Mehrkosten	Geringe Mehrkosten	Keine Mehrkosten	Reduzierung der Kosten
Geringer Aufwand in der Nachbearbeitung	Hoher zusätzlicher Nachbearbeitungsaufwand	Geringer zusätzlicher Nachbearbeitungsaufwand	Kein zusätzlicher Nachbearbeitungsaufwand	Geringe Minimierung des Nachbearbeitungsaufwandes	Hohe Minimierung des Nachbearbeitungsaufwandes

Tabelle 10-2: Ausgefüllte universale K-I-Kombinationsmatrix (fortlaufend)

	Attribute aus...									
	Kundenindividuellem Anforderungsprofil					Bauteilgeometrie				Aufwand
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀ (K _{F,i,j})
K1 I1	1	1	1	FDM SLS SLM	NBV1; NBV2; NBV3; NBV4; NBV5; NBV6; NBV8; NBV9	1	1	0	0	0,6875
K1 I2	1	1	0	FDM SLS	NBV1; NBV2; NBV3; NBV4; NBV5; NBV6	1	1	0	0	0,625
K1 I3	1	1	0	FDM SLS SLM	NBV1; NBV2; NBV3; NBV4; NBV5; NBV6; NBV8; NBV9	1	1	0	0	0,625
K1 I4	1	1	0	FDM SLS	NBV1; NBV2; NBV3; NBV4; NBV5; NBV6	1	1	0	0	0,625
K1 I5	1	1	0	FDM	NBV1; NBV3; NBV4; NBV5; NBV7	1	1	0	0	0,5625
K2 I1	1	1	1	FDM SLS SLM	NBV1; NBV2; NBV3; NBV4; NBV5; NBV6; NBV8; NBV9	1	1	0	0	0,75
K2 I2	1	1	0	FDM SLS	NBV1; NBV2; NBV3; NBV4; NBV5; NBV6	1	1	0	0	0,625
K2 I3	1	1	0	FDM SLS SLM	NBV1; NBV2; NBV3; NBV4; NBV5; NBV6; NBV8; NBV9	1	1	0	0	0,6875
K2 I4	1	1	0	FDM SLS	NBV1; NBV2; NBV3; NBV4; NBV5; NBV6	1	1	0	0	0,5625

Tabelle 10-2: Ausgefüllte universale K-I-Kombinationsmatrix (fortlaufend)

	Attribute aus...									
	Kundenindividuellem Anforderungsprofil					Bauteilgeometrie				Aufwand
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀ (K _{F,i,j})
K3 I1	1	1	1	FDM SLS SLM	NBV1; NBV2; NBV3; NBV6; NBV8; NBV9	1	0	0	0	0,6875
K3 I2	1	1	0	FDM SLS	NBV1; NBV2; NBV3; NBV6	1	0	0	0	0,5625
K3 I3	1	1	0	FDM SLS SLM	NBV1; NBV2; NBV3; NBV6; NBV8; NBV9	1	0	0	0	0,625
K3 I4	1	1	0	FDM SLS	NBV1; NBV2; NBV3; NBV6	1	0	0	0	0,5
K4 I1	0	1	1	FDM SLS SLM	NBV1; NBV2; NBV3; NBV4; NBV5; NBV6; NBV8; NBV9	1	0	0	0	0,4375
K4 I2	0	1	0	FDM SLS	NBV1; NBV2; NBV3; NBV4; NBV5; NBV6	1	0	0	0	0,3125
K4 I3	0	1	0	FDM SLS SLM	NBV1; NBV2; NBV3; NBV4; NBV5; NBV6; NBV8; NBV9	1	0	0	0	0,375
K4 I4	0	1	0	FDM SLS	NBV1; NBV2; NBV3; NBV4; NBV5; NBV6	1	0	0	0	0,3125
K5 I1	0	1	1	FDM SLS SLM	NBV2; NBV6; NBV8; NBV9	0	0	1	0	0,375
K5 I2	0	1	0	FDM SLS	NBV2; NBV6	0	0	1	0	0,25

Tabelle 10-2: Ausgefüllte universale K-I-Kombinationsmatrix (fortlaufend)

	Attribute aus...									
	Kundenindividuellem Anforderungsprofil					Bauteilgeometrie				Aufwand
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀ (K _{F,i,j})
K5 I3	0	1	0	FDM SLS SLM	NBV2; NBV6; NBV8; NBV9	0	0	1	0	0,3125
K5 I4	0	1	0	FDM SLS	NBV2; NBV6	0	0	1	0	0,25
K6 I1	0	1	1	FDM SLS SLM	NBV1; NBV2; NBV3; NBV4; NBV5; NBV6; NBV7; NBV8; NBV9	0	0	0	1	0,4375
K6 I2	0	1	0	FDM SLS	NBV1; NBV2; NBV3; NBV4; NBV5; NBV6; NBV7; NBV8; NBV9	0	0	0	1	0,3125
K6 I3	0	1	0	FDM SLS SLM	NBV1; NBV2; NBV3; NBV4; NBV5; NBV6; NBV7; NBV8; NBV9	0	0	0	1	0,375
K6 I4	0	1	0	FDM SLS	NBV1; NBV2; NBV3; NBV4; NBV5; NBV6; NBV7; NBV8; NBV9	0	0	0	1	0,3125

Legende: K_iI_j = Kombination aus Kennzeichnungsträger K_i und Identifikatorart I_j; A_k = Attribut; K_{F,i,j} = wirtschaftliche Wertigkeit; FDM = Fused Deposition ModellingTM (Strangablegeverfahren); SLS = Selektives LasersinternTM (Kunststoff-Laser-Sintern); SLM = Selective Laser MeltingTM (Laser-Strahlschmelzen); NBV = Nachbearbeitungsverfahren

Lebenslauf

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.

Kontakt über:

XING: www.xing.com/profile/Alexander_Arndt19/